

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikka / tietoverkkotekniikka

Joonas Hasu

TUOTANTOVERKON PÄIVITYS AALLONPITUUSKANAVOINTITEKNIIKAN
KÄYTTÄMISEEN

Opinnäytetyö 2013

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Tietoverkkotekniikka

HASU, JOONAS

TUOTANTOVERKON PÄIVITYS

AALLONPITUUSKANAVOINTITEKNIIKAN

KÄYTTÄMISEEN

Opinnäytetyö

48 sivua

Työn ohjaaja

Martti Kettunen, yliopettaja

Toimeksiantaja

KYMP Oy

Huhtikuu 2013

Avainsanat

WDM, CWDM, DWDM, SimuNet, migraatio

Elämme yhteiskunnassa, jossa tiedonsiirrolle asetetut kapasiteettivaatimukset kasvavat jatkuvasti. WDM-tekniikalla pyritään vastaamaan näihin tarpeisiin. Tämä opinnäytetyö toteutettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun SimuNet-nimisessä testi- ja tuotekehityslaboratoriossa. Työn teoriaosuudessa käsitellään CWDM- ja DWDM-tekniikoita.

Työn tavoitteena oli saada SimuNetin runkoyhteydet siirrettyä kuljetettavaksi valokuiduilla useilla eri aallonpituuksilla käyttäen CWDM-tekniikkaa, joka tarkoittaa karkeaa aallonpituuskanavointia. Työssä käytettävät laitteet ovat Allied Telesin valmistamia AT-WD1008-laitteita.

SimuNetin runkoyhteydet siirrettiin CWDM-järjestelmään siten, että runkoyhteyksien redundanttisuus säilyy. Huomiota yhteyksien suunnittelemisessa kiinnitettiin myös siihen, että yksittäisen laitteen tai linkin hajoaminen ei estä tietoverkon toimintaa.

Työn lopputuloksena saatiin SimuNetin runkoyhteydet siirrettyä onnistuneesti aallonpituuskanavointitekniikkaan huoltokatkosuunnitelmaa apuna käyttäen ilman verkon saatavuuden häiriintymistä. Lopullinen kytkentä tehtiin käyttämällä neljää CWDM-laitetta.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Information Technology

HASU, JOONAS

UPGRADING OF PRODUCTION NETWORK TO USE
WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING
TECHNOLOGY

Bachelor's Thesis

48 pages

Supervisor

Martti Kettunen, Senior Teacher

Commissioned by

KYMP Oy

April 2013

Keywords

WDM, CWDM, DWDM, SimuNet, migration

We are living in a society where the demands for the capacity of data transfer are constantly growing. WDM technology strives to answer these demands. This bachelor's thesis was carried out at Kymenlaakso University of Applied Sciences' testing network SimuNet. The theoretical section of this study covers CWDM and DWDM technologies.

The goal of this study was to transfer the backbone connections of SimuNet to be carried with several different optical wavelengths using CWDM technology, which stands for Coarse Wavelength-Division Multiplexing. The AT-WD1008 devices used in this study were manufactured by Allied Telesis.

The backbone connections of SimuNet were transferred to the CWDM system by taking the redundant design of the connections into consideration. Special attention was also paid to the fact that even if one of the CWDM devices or links should fail, the network would still be fully functional.

As a result of this study, the backbone connections of SimuNet were successfully transferred into wavelength-division multiplexing technology without the availability of the network suffering with the help of a maintenance plan of this study. The final connection was made by using four CWDM devices.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 8 |
| 2 | OPTISET JÄRJESTELMÄT | 8 |
| 2.1 | Optiset kuidut | 9 |
| 2.2 | Valon tahtuminen kuidussa | 11 |
| 3 | WDM-TEKNIikka | 12 |
| 3.1 | WDM-historia | 12 |
| 3.2 | WDM-teoria | 13 |
| 4 | CWDM | 15 |
| 4.1 | Standardit | 16 |
| 4.1.1 | ITU-T G.694.2: CWDM-aallonpituustaulukot | 16 |
| 4.1.2 | ITU-T G.695: Optiset rajapinnat CWDM-sovelluksille | 17 |
| 4.1.3 | ITU-T G.671: Optisten komponenttien ja alijärjestelmien lähetysoinaisuusdet | 20 |
| 4.2 | CWDM kaupunkitietoverkoissa | 21 |
| 4.3 | Lähetin-vastaanottimet | 22 |
| 4.4 | Vahvistimet | 25 |
| 4.4.1 | Optisen vahvistuksen periaate | 26 |
| 4.4.2 | Vahvistuksen haasteet ja toteutus | 26 |
| 4.4.3 | Erbium-rikastetut valokuidut | 27 |
| 4.4.4 | Optiset puolijohdevahvistimet | 27 |
| 4.4.5 | Raman | 28 |
| 4.4.6 | Kohina | 28 |
| 4.5 | CWDM-järjestelmien aallonpituudet | 29 |
| 5 | DWDM | 30 |
| 5.1 | DWDM-järjestelmät ja standardit | 30 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.1 | ITU-T G.698.1: Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces | 30 |
| 5.1.2 | ITU-T G.973.1 Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fibre submarine cable systems | 31 |
| 5.1.3 | Pisteestä pisteeseen DWDM-järjestelmät | 32 |
| 5.1.4 | DWDM-järjestelmät kaupunkitietoverkoissa | 33 |
| 5.2 | DWDM-järjestelmissä käytettävät aallonpituudet | 34 |
| 5.3 | Dispersion hallinta | 35 |
| 5.4 | DWDM-tekniikan ongelmia | 35 |
| 5.4.1 | Yhteensopivuus | 35 |
| 5.4.2 | Optisen suorituskyvyn tarkkailu | 36 |
| 5.4.3 | Tulevaisuutta varten valmistelu | 36 |
| 6 | SIMUNET-VERKKO JA TEHTÄVÄN MÄÄRITTELY | 36 |
| 6.1 | SimuNet | 36 |
| 6.2 | Tehtävän määrittäminen | 37 |
| 7 | HUOLTOKATKOSUUNNITELMA: SIMUNETIN RUNKOYHTEYKSIEN SIIRTO CWDM-TEKNIikkaan | 38 |
| 8 | TYÖN TOTEUTUS JA TESTAUS | 41 |
| 9 | YHTEENVETO | 44 |

LYHENNELUETTELO

| | |
|-------|--|
| APD | Avalanche Photodiode: <i>Erittäin herkkä puolijohdeilmaisain</i> |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode: <i>Asynkroninen tiedonsiirtotapa</i> |
| CWDM | Coarse Wavelength-Division Multiplexing: <i>Karkea aallonpituuskanavointi</i> |
| DWDM | Dense Wavelength-Division Multiplexing: <i>Tiheä aallonpituuskanavointi</i> |
| EAKR | Euroopan aluekehitysrahasto: <i>Rahasto tukee hankkeita, jotka kehittävät yrityksiä, innovaatioiden syntymistä sekä osaamista</i> |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier: <i>Erbium-rikastettu valokuitu</i> |
| ESCON | Enterprise Systems Connection: <i>Keskustietokoneiden ja päätelaitteiden yhdistämiseen tarkoitettu tekniikka</i> |
| FTTC | Fiber to the curb: <i>Kuitu jakamoon</i> |
| FTTH | Fiber to the home: <i>Kuitu kotiin</i> |
| GBIC | Gigabit Interface Converter: <i>Mediamuunnin</i> |
| HD | High Definition: <i>Teräväpiirto</i> |
| IEEE | Institute of Electronic and Electrical Engineering: <i>Kansainvälinen tekniikan alan järjestö</i> |
| IP | Internet Protocol: <i>Protokolla joka vastaa päätelaitteiden osoitteista ja pakettien reitityksestä</i> |
| ITU-T | International Telecommunication Union -Telecommunication Standardization Sector: <i>Kansainvälinen televiestintäliiton standardisointijärjestö</i> |
| LAN | Local Area Network: <i>Lähiverkko</i> |
| LC | Little Connector: <i>Pienikokoinen liitin</i> |
| MT-RJ | Mechanical Transfer Registered Jack: <i>Duplex yhteyksissä käytetty liitin</i> |
| MU | Miniature Unit: <i>Pienikokoinen yksikkö</i> |
| NRZ | Non-Return-to-zero: <i>Modulaatiotekniikka</i> |
| OADM | Optical Add-Drop Multiplexer: <i>Syöttö- ja pudotusmultiplekseri</i> |
| OSPF | Open Shortest Path First: <i>TCP/IP-verkkojen reititysprotokolla</i> |
| PIN | <i>Photodiode-ilmaisain</i> |
| QSFP | Quad Small Form Pluggable: <i>Nelikanavainen pienikokoinen lähetinvastaanotin</i> |
| RZ | Return-to-zero: <i>Modulaatiotekniikka</i> |
| SC | Standard Connector: <i>Tavallinen liitin</i> |

| | |
|--------|---|
| SFP | Small Form Pluggable: <i>Pienikokoinen lähetinvastaanotin</i> |
| SOA | Semiconductor Optical Amplifier: <i>Optinen puolijohdevahvistin</i> |
| SONET | Synchronous Optical Networking: <i>Synkroninen optinen verkko</i> |
| STM | Synchronous Transport Module: <i>Optisen kuituverkon tiedonsiirtostandardi</i> |
| TCP | Transmission Control Protocol: <i>IP-protokollan päällä toimiva protokolla, joka vastaa kahden päätelaitteen välisestä tiedonsiirtoyhteydestä ja menetettyjen pakettien uudelleenlähetyksestä</i> |
| T1 | T1: <i>Digitaalinen lähetystekniikka</i> |
| WDM | Wavelength-Division Multiplexing: <i>Aallonpituuskanavointi</i> |
| WWW | World Wide Web: <i>Hypertekstijärjestelmä</i> |
| 3R-OEO | Reshaping, Retiming, Restoring – Optical-Electronic-Optical: <i>Signaalin uudelleenmuokkaava, ajoittava ja vahvistava toistin</i> |

1 JOHDANTO

Koska tietoverkkojen vaatimukset kasvavat jatkuvasti, täytyy keksiä uusia keinoja kasvattaa verkkojen tiedonsiirtokapasiteettia. Tietoa pitää pystyä siirtämään häiriöttömästi hyvin pitkiä matkoja. Yhtenä suurimmista kysymyksistä sopivaa tekniikkaa valittaessa on hinta. Erityisesti CWDM-tekniikka omaa hyvän hinta-suorituskyky-suhteen, joka mahdollistaa pienten ja keskikokoisten tietoverkkojen kapasiteetin kasvattamisen.

Tämän opinnäytetyön pääpaino on CWDM- ja DWDM-tekniikoiden teorian käsittelyssä sekä AT-WD1008 CWDM-laitteiden käyttöönotossa ja migraatiossa Kymenlaakson ammattikorkeakoulun testiympäristö SimuNetiin. Opinnäytetyössä käsitellään myös WDM-tekniikan periaatteet ja siinä käytettäviä laitetyppejä. WDM-tekniikasta tarkemmin läpikäytävät menetelmät ovat CWDM ja DWDM. CWDM-tekniikan teoriaosuus tulee olemaan kattavin, koska SimuNetiin asennettavat laitteet käyttävät kyseistä tekniikkaa. Opinnäytetyössä tarkastellaan myös eri tyyppisten valokuitujen ominaisuuksia. Laitteiden migraatiovaihetta varten tehdään yksityiskohtainen huoltokatkosuunnitelma, jotta varmistutaan että käyttöönotto sujuu ongelmitta.

Tämän työn tavoite on siirtää Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa sijaitsevan testiympäristö SimuNetin runkoverkkoyhteydet CWDM-aallonpituuskanavointijärjestelmään. SimuNet tulee luonnollisesti olemaan tärkeä osa tätä opinnäytetyötä, sillä fyysinen osuus työstä tullaan suorittamaan siellä.

2 OPTISET JÄRJESTELMÄT

Kuituoptiikka on suhteellisen uusi tekniikan ala. Viime vuosina ala on kuitenkin kasvanut räjähdysmäisesti ja syy tähän on selvä: internet. Ennen internetiä vaatimukset tiedonsiirtonopeuksille olivat vielä varsin vaatimattomat. Internetin yleistyttyä täytyi alkaa etsiä keinoja, joilla voidaan kasvattaa tiedonsiirtonopeuksia. Ihmisten kulutustottumukset ovat myös ajan saatossa muuttuneet. Nykyisin käytetään paljon sovelluksia, jotka ovat erittäin vaativia tiedonsiirtonopeuden kannalta. Tällaisia

sovelluksia ovat esimerkiksi WWW-liikenne, videopuhelut sekä videoiden suoratoisto. (Sivalingam & Subramaniam 2000, 3 – 4.)

Elämme yhteiskunnassa, jossa tieto on elintärkeää. Tiedon täytyy olla saatavilla kaikissa mahdollisissa muodoissa, missä tahansa ja milloin tahansa. Viiveiden täytyy pysyä pieninä eikä pitkäaikaisia katkoja palvelussa voida sallia. (Sivalingam & Subramaniam 2000, 3.)

Kuituoptiikka tuo ratkaisun jatkuvasti kasvaviin tiedonsiirtovaatimuksiin sen potentiaalisesti rajattoman tiedonsiirtokyvyn ansiosta. Tulevaisuuden haastena tuleekin olemaan se, miten pystytään pienentämään tiedonsiirtonopeuseroja kuituoptiikan ja elektroniikan välillä. Koska loppukäyttäjät kytkeytyvät verkkoon elektronisesti, on selvää, että tiedonsiirtoa rajoittava pullonkaula syntyy loppukäyttäjän laitteissa. (Sivalingam & Subramaniam 2000, 3 – 4.)

2.1 Optiset kuidut

Valokuitu on tiedonsiirron kannalta elintärkeä komponentti, sillä valokuitu on se järjestelmän osa, joka kuljettaa signaalit eteenpäin. Valokuidulla on monia ominaisuuksia, joiden ansiosta se sopii hyvin käytettäväksi korkeanopeuksisissa tietoverkkosovelluksissa. Häviöt valokuidussa voivat olla hyvin pieniä, jopa 0,2 dB kilometriä kohden, joten dataa voidaan kuljettaa pitkiäkin matkoja. Valokuituja on kolmea eri tyyppiä: askeltaitekertoiminen monimuotokuitu, asteittaistaitekertoiminen monimuotokuitu ja yksimuotokuitu. Valokuitujen jaottelu näihin kolmeen luokkaan tapahtuu sen perusteella, miten valo etenee valokuidussa. (Sivalingam & Subramaniam 2000, 29.)

Askelmuotokuidussa etenevät valonsäteet kulkevat jokainen eri kulmissa, sillä ytimen halkaisija on paljon suurempi kuin valon aallonpituus. Koska jokainen valonsäde heijastuu eri kulmassa, on niillä myös eripituinen matka määränpäähänsä. Tämän takia pulssi levenee kun se etenee kuidussa, eli syntyy muotodispersiota. (Helkama Bica 2001, 19.)

Syntyvää muotodispersion määrää pystytään arvioimaan, kun tiedetään signaalien kulkema lyhyin sekä pisin matka, ja tutkitaan signaalien käyttämää aikaa kulkemaansa matkaan. Lyhyin mahdollinen matka, jonka signaali voi kulkea, on L eli sama kuin

valokuidun pituus. Pisin matka pystytään laskemaan kaavalla $L_p = L / \sin \varphi_c$, jossa φ_c on kriittinen kulma. (Agrawal 2010, 26.)

Yksittäisen pulssin muotodispersion määrä askelmuotokuidussa voidaan laskea kaavalla

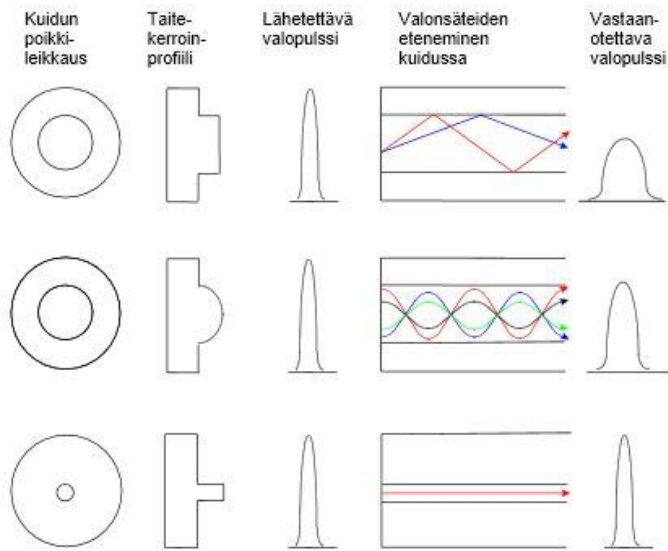
$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \left(\frac{L}{\sin \varphi_c} - L \right) = \frac{L}{c} \frac{n_1^2}{n_2},$$
 jossa n_1 on ytimen taitekerroin ja n_2 on kuoren taitekerroin. (Agrawal 2010, 26.)

Asteittaistaitekuidussa taittuminen ei tapahdu yhtä jyrkästi kuin askelkuidussa, vaan valonsäteet taittuvat vähitellen. Valonsäteet etenevät jokainen omassa kulmassaan myös asteittaistaitekuidussa. Valonsäteen nopeus on valokuidun ytimen reunoilla suurempi kuin ytimen keskiosassa, joten muotodispersiota ja vaimenemista ei tapahdu yhtä paljon kuin askelmuotokuidussa. (Helkama Bica 2001, 19.)

Asteittaistaitekuituja ei juurikaan käytetä pitkien matkojen yhteyksissä, mutta niitä voidaan käyttää lyhyillä matkoilla. Lyhyillä matkoilla voidaan käyttää muoviytimisiä asteittaistaitekuituja. Tällaisia kuituja käytettäessä syntyvä vaimennus on suurta, jopa 20 dB/km. Muoviytimisiä kuituja voidaan käyttää alle kilometrin matkoilla ja niillä voidaan saavuttaa 1 Gb/s tiedonsiirtonopeus. (Agrawal 2010, 29.)

Yksimuotokuidussa kulkee ainoastaan yksi pulssi, sillä sen ytimen halkaisija on niin pieni, vain 9 μm . Yksimuotokuidussa ei tapahdu muotodispersiota, mutta sen sijaan yksimuotokuidussa esiintyy kromaattista dispersiota. (Helkama Bica 2001, 20.)

Kromaattista dispersiota syntyy, kun pulssin eri aallonpituudet kulkevat hieman eri ryhmänopeuksilla. Tätä ilmiötä kutsutaan ryhmänopeusdispersioksi. (Agrawal 2010, 39).

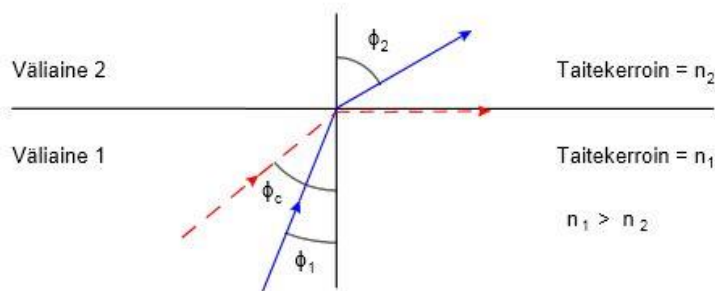


Kuva 1. Valokuitujen eri tyypit ja miten valo etenee kyseisessä kuidussa.

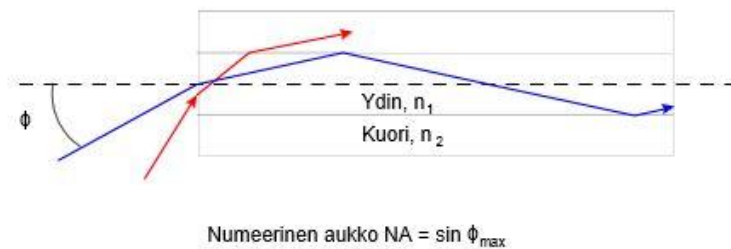
Ensimmäinen on askel-, toinen asteittais- ja viimeinen yksimuotokuitu. (Helkama Bica 2001, 19.)

2.2 Valon taittuminen kuidussa

Valokuidun toiminta perustuu valon taittumis- ja heijastumlakeihin aineiden rajapinnassa. Ilmiötä, joka mahdollistaa signaalin etenemisen valokuidussa, kutsutaan kokonaisheijastumiseksi. Ilman kokonaisheijastumista valo pystyisi pakenemaan valokuidusta, eikä valokuitu näin ollen pystyisi kuljettamaan signaalia kuidun päästä päähän. Kulmaa, jossa kokonaisheijastuminen tapahtuu, sanotaan kriittiseksi kulmaksi. (Helkama Bica 2001, 17.)



Kuva 2. Valon taittumisperiaate. Kriittinen kulma on merkitty kuvassa ϕ_c . (Helkama Bica 2001, 17)



Kuva 3. Valonsäteen heijastuminen valokuidussa ja numeerisen aukon laskukaava (Helkama Bica 2001, 18)

Kun valonsäteen tulokulma on valokuidun x-akseliin nähden riittävän pieni, lähtee valonsäde kulkemaan valokuidussa ja ytimen ja kuoren välillä tapahtuu kokonaisheijastuminen. Suurinta sallittua tulokulmaa kutsutaan numeeriseksi aukoksi.

3 WDM-TEKNIikka

Wavelength-Division Multiplexing, eli aallonpituuskanavointi on tiedonsiirtotekniikka, jonka avulla tietoverkkojen tiedonsiirtokapasiteetti voidaan nostaa hyvin korkeaksi. Tarve uusille ratkaisuille onkin nyky-yhteiskunnassa suuri, sillä tiedonsiirtonopeuksille asetetut vaatimukset tulevat tulevaisuudessa vain kasvamaan entisestään. (Sivalingam & Subramaniam 2000.)

3.1 WDM-historia

WDM-tekniikka on ollut kehityksessä jo pitkän aikaa. Sitä on kehitetty siitä lähtien, kun ensimmäiset valoaltojärjestelmät tulivat markkinoille vuonna 1980. Vuonna 1982 WDM-tekniikkaa käytettiin ensimmäisen kerran sen yksinkertaisimmassa muodossa, eli samassa kuidussa lähetettiin dataa käyttäen kahta eri kanavaa. 1990-luvulla erityistä huomiota kiinnitettiin kanavavälin pienentämiseen. Jo vuonna 2000 oli saatavilla WDM-järjestelmiä, joiden kokonaistiedonsiirtonopeus ylitti 1,6 Tb/s. Nykyaikaiset WDM-järjestelmät ovat kuitenkin kehittyneet tästä paljon pidemmälle, sillä nykyaikaisen WDM-järjestelmän kokonaistiedonsiirtonopeus on jopa 70 Tb/s. Tällaisia järjestelmiä kutsutaan Dense WDM-järjestelmiksi, eli tiheiksi WDM-järjestelmiksi. (Agrawal 2010, 224.)

WDM-tekniikka on tämän hetken suosituin kuituoptiikan teknologiamuoto, sillä WDM-tekniikka mahdollistaa sen, että loppukäyttäjän laitteiden ei tarvitse toimia kuin

ainoastaan WDM-kanavan bittinopeudella. Tämä kanavanopeus on mahdollista valita mielivaltaisesti, jonka ansiosta WDM:n käyttöönotto on helppoa. Juuri tämä WDM-tekniikan ominaisuus on johtanut siihen, että useimmat suuret operaattorit käyttävät tätä tekniikkaa. (Sivalingam & Subramaniam 2000, 4.)

3.2 WDM-teoria

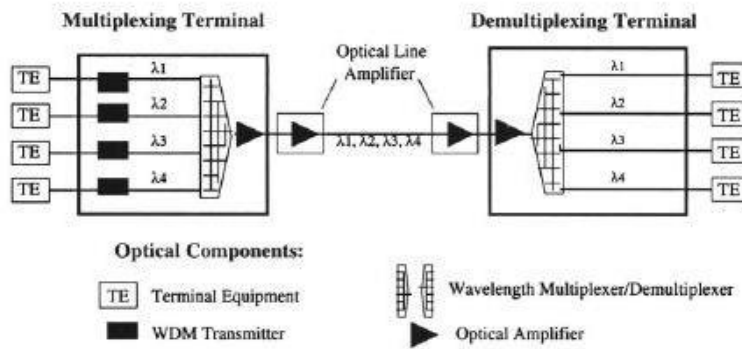
WDM-tekniikan perusidea on se, että yhtä valokuitua pitkin kuljetetaan yhtäaikaista monia signaaleja käyttäen useita aallonpituuksia. Aluksi signaali multipleksoidaan ja kun se saavuttaa vastaanottimen, se demultipleksoidaan erillisiksi kanaviksi.

Esimerkiksi, satoja 40 Gb/s kanavia on mahdollista kuljettaa käyttäen samaa valokuitua 100 GHz kanavavälillä, joka on 0,8 nm 1552 nm aallonpituudella. 100 GHz kanavavälillä yksittäisen kanavan hyötysuhde on kuitenkin huono, vain 0,1 b/s/Hz bittinopeuden ollessa 10 Gb/s. (Agrawal 2010, 223–224.) Jos käytetään 50 GHz kanavaväliä, saavutetaan parempi yksittäisen kanavan hyötysuhde. 50 GHz kanavavälillä hyötysuhteeksi saadaan 0,8 b/s/Hz ja bittinopeudeksi 40 Gb/s. (Agrawal 2010, 224.)

Taulukko 1. WDM-tekniikalla suoritettuja testejä. (Agrawal 2010, 226.)

| Year | Channels <i>N</i> | Bit Rate <i>B</i> (Gb/s) | Capacity <i>NB</i> (Tb/s) | Distance <i>L</i> (km) | <i>NBL</i> Product [(Pb/s)-km] |
|------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 2001 | 256 | 40 | 10.24 | 100 | 1.02 |
| 2001 | 273 | 40 | 10.92 | 117 | 1.28 |
| 2006 | 154 | 80 | 12.32 | 240 | 2.96 |
| 2007 | 320 | 80 | 25.60 | 240 | 6.14 |
| 2007 | 204 | 100 | 20.40 | 240 | 4.90 |
| 2009 | 320 | 100 | 32.00 | 580 | 18.56 |
| 2010 | 432 | 160 | 69.12 | 240 | 16.59 |

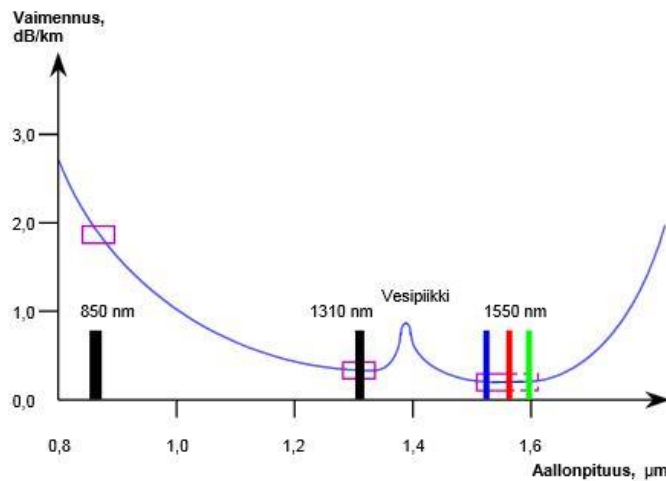
WDM-tekniikalla on mahdollista saavuttaa hyvin korkea tiedonsiirtokapasiteetti. 100 Gb/s tiedonsiirtonopeudella toimivia kanavia voidaan käyttää pienimmillään 25 GHz (0,2 nm) välein. Pienihäviöiselle 1300 – 1600 nm kaistanleveydelle mahtuu 1500 kanavaa 0,2 nm välein. $1500 * 100 \text{ Gb/s} = 150 \text{ Tb/s}$. Käytännössä näin suuria lukuja ei vielä kuitenkaan saavuteta. Erbium-rikastettujen valokuitujen käytettävissä oleva kaistanleveys rajoittuu yleensä noin 40 nanometriin. Tästä syystä kaikkia mahdollisia kanavia ei saada käyttöön, joten tiedonsiirtokapasiteetti jää pienemmäksi, kuin teoreettisesti on mahdollista saavuttaa. (Agrawal 2010, 226.)



Kuva 4. WDM:n toimintaperiaate (Sivalingam & Subramaniam 2000, 7)

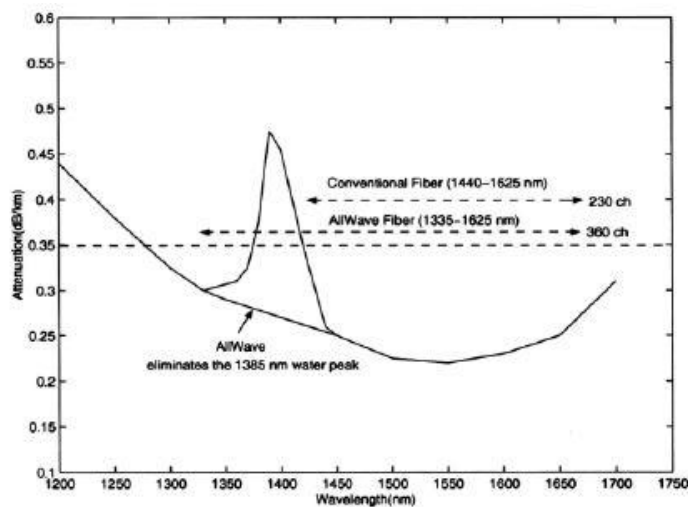
Kuvasta 4 nähdään WDM:n toimintaperiaate. Kuvassa on neljän kanavan point-to-point systeemi. Multiplekseriin menee sisään neljä eri signaalia, joista jokainen on eri aallonpituudella. Multiplekseri ja demultiplekseri on yhdistetty toisiinsa yhdellä valokuidulla. Kaikki signaalit kulkevat samaa valokuitua pitkin demultiplekseriin. Demultiplekserin tehtävänä on vastaanottaa signaali ja signaalin saapuessa demultiplekseriin laite erottelee siitä eri aallonpituudet ja ohjaa ne oikealle kanavalle. (Sivalingam & Subramaniam 2000, 7.)

WDM-järjestelmien tiedonsiirrossa on kolme aallonpituusalueita käytössä: 850 nm alue, 1310 nm alue ja 1550 nm alue. Näitä alueita käytetään siksi, että valokuidussa tapahtuva vaimennus on pienintä niiden aallonpituusalueella. Absorptio ja sironta ovat kaksi suurinta seikkaa, jotka aiheuttavat vaimennusta. Absorptio johtuu valokuidussa olevista epäpuhtauksista sekä valotehon osittaisesta imeytymisestä valokuituun. Kun valo heijastuu kuidun ytimen reunoista, niin hyvin pienet taitekerroinerot aiheuttavat valon heijastumista kaikkiin suuntiin. Epäpuhtauksista yksittäinen suurin tekijä ovat OH^- -ionit. (Helkama Bica 2001, 23). Kuvassa 5 merkitty niin sanottu vesipiikki 1385 nm:n kohdalla johtuu OH^- -ioneista. (Helkama Bica 2001, 23 – 24.)



Kuva 5. Optisissa järjestelmissä käytettävät aallonpituusikkunat (Helkama Bica 2001, 23)

Nykyään on kuitenkin olemassa valokuituja, joita käytettäessä vesipiikki pystytään eliminomaan ja koko aallonpituusalue saadaan käyttöön, kuten alla olevasta kuvasta nähdään.



Kuva 6. Niin sanotulla AllWave-kuidulla ei ole vesipiikkiä (Sivalingam & Subramaniam 2000, 11)

4 CWDM

CWDM on lyhenne Coarse Wavelength Division Multiplexingista eli karkeasta aallonpituuskanavoinnista. Karkea aallonpituuskanavointi tarkoittaa sitä, että järjestelmä käyttää suhteellisen suurta kanavaväliä.

CWDM-järjestelmien tiedonsiirtokapasiteetti ei ole yhtä suuri kuin nykyaikaisten WDM-järjestelmien, mutta CWDM-järjestelmillä on kuitenkin oma paikkansa vielä nykypäivänäkin. Esimerkiksi monimutkaisten DWDM-järjestelmien käyttöönotto on kallista. Varsinkin lyhyen matkan tietoverkoissa järjestelmän hinnan merkitys korostuu. Lähellä loppukäyttäjää halutaan käyttää optista järjestelmää, jossa on hyvä hinta – suorituskky-suhde, ja joka on samalla joustava ja omaa hyvät päivitysominaisuudet. Järjestelmän hintaa saadaan alemmaksi yksinkertaistamalla sitä. CWDM-järjestelmissä laserien vaatimukset eivät ole niin tarkkoja, eikä niissä tarvitse käyttää erillistä jäähdytystä. Valokuitujen hinta CWDM-järjestelmissä on myös pienempi. Tietoverkoista, joiden vaatimukset laserien ja muiden laitteiden suhteen eivät ole yhtä tarkkoja, kuin DWDM:llä, on alettu käyttää nimitystä Metro DWDM. (Thiele & Nebeling 2007, 1.)

4.1 Standardit

Yleisesti hyväksytyt standardit hyödyttävät sekä laitteiden valmistajia että niiden kuluttajia, sillä uuden teknologian käyttöönotto helpottuu ja kustannukset alenevat. (Thiele & Nebeling 2007, 2).

On olemassa monia kansainvälisiä CWDM-standardeja, mutta tärkeimmät niistä ovat ITU-T G.694.2 Spektritaulukko WDM-sovelluksille: CWDM-aallonpituustaulukko, ITU-T G.695 Optiset rajapinnat CWDM-sovelluksille ja ITU-T G.671 Optisten komponenttien ja alijärjestelmien ominaisuudet (Thiele & Nebeling 2007, 2.)

4.1.1 ITU-T G.694.2: CWDM-aallonpituustaulukot

ITU-T G.694.2-standardi määrittelee aallonpituudet, joita tulee käyttää CWDM-sovelluksissa. CWDM-tekniikan yleistymisen kannalta tämä oli erittäin tärkeää, sillä standardin myötä laitevalmistajat pystyvät valmistamaan tietynlaisia komponentteja. Se antoi myös internetoperaattoreille varmuutta siitä, että laitteet tulevat olemaan jatkossa yhteensopivia keskenään. Käytettävät aallonpituudet ovat 1270 – 1610 nm. (Thiele & Nebeling 2007, 2.)

CWDM-järjestelmissä käytettävät laserit määritellään 25 °C:een. Esimerkiksi 0 °C:ssa lyhyin aallonpituus siirtyy -2,5 nm, joka aiheuttaa sen, että aallonpituusikkunasta tulee epäsymmetrinen. Tyypillinen epäsymmetrisyys tällöin on välillä -5,5 – 7,5 nm, jolloin

aallonpituus 1550 nm – kanavalla olisi 1544,5 – 1557,5 nm missä tahansa lämpötilassa. Tämä ongelma ratkaistiin siten, että CWDM-suodattimilla tasapainotettiin G.694.2-standardin aallonpituuksia 1 nm verran, ja että suodattimilla oli $\pm 6,5$ nm:n päästökaista. Näistä syistä onkin hyvin tärkeää, että käytettävien laitteiden aallonpituuden todellinen keskikohta on tiedossa. (Thiele & Nebeling 2007, 2.)

Taulukko 2. Nimelliset keskiaallonpituudet 20 nm kanavavälille. (ITU-T G.694.2 2003, 3.)

| |
|---------|
| 1271 nm |
| 1291 nm |
| 1311 nm |
| 1331 nm |
| 1351 nm |
| 1371 nm |
| 1391 nm |
| 1411 nm |
| 1431 nm |
| 1451 nm |
| 1471 nm |
| 1491 nm |
| 1511 nm |
| 1531 nm |
| 1551 nm |
| 1571 nm |
| 1591 nm |
| 1611 nm |

4.1.2 ITU-T G.695: Optiset rajapinnat CWDM-sovelluksille

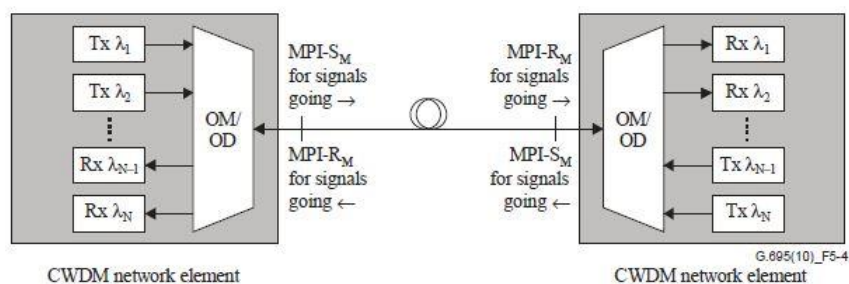
G.695-standardi on rakennettu ITU-T G.694.2-standardin pohjalta. G.695-standardissa määritellään optisten rajapintojen ominaisuudet monille sovelluksille, joilla jokaisella on eri määrä kanavia, eri bittinopeus, eri siirtoetäisyydet sekä valokuitutyypit. Erityistä huomiota kiinnitettiin sovellusten määrittelyyn. Määrittelyjä tehtiin muun muassa lähetin-vastaanottimille, linjakorteille, kytkimille, Ethernetille sekä kuitukanaville. (Thiele & Nebeling 2007, 2.)

G.695-standardissa määritellään optiset ominaisuudet fyysisen kerroksen liityntärajapinnoille enimmillään 16 kanavaisille ja 10 Gb/s CWDM-sovelluksille

käyttäen kahta eri toteutustapaa: musta linkki ja musta laatikko. (ITU-T G.695 2010, 1.)

Musta laatikko -mallin fyysisessä toteutuksessa laserit ja mux-filterit ovat molemmat samassa ”mustassa laatikossa”. Vastaanotinpäässä demux-filterit ja laserit ovat samaten samassa laatikossa. Multiplekserit ja laserit ovat siis molemmat samassa fyysisessä yksikössä, jossa kuituyhteydet CWDM-lasereiden ja multipleksereiden välillä on liitetty sisäisesti. Fyysiset yksiköt voidaan toteuttaa myös siten, että niissä on erilliset vastaanotinkortit sekä erilliset muxerit, jotka ovat liitetty toisiinsa. Linkkejä lasereiden ja muxereiden, sekä lasereiden ja demuxereiden välillä ei ole määritelty G.695-standardissa musta laatikko-sovelluksille. (Thiele & Nebeling 2007, 5-6.)

Musta laatikko -malli on tärkeä, koska sen ansiosta järjestelmäsuunnittelijat pystyvät tekemään valintoja muxereiden ja demuxereiden yhdistetyissä häviöissä eri aallonpituuksilla. Tällöin järjestelmä pystytään optimoimaan suurimmalle lähetyskäisyydelle, pienelle koolle ja paremmalle lämpösuorituskyvyille. Musta laatikko -mallilla toteutetun järjestelmän käyttöönotto on helppoa, mikä on yksi sen hyvistä puolista. Tällaiset järjestelmät ovat niin sanottuja plug-and-play-järjestelmiä, jolloin ei ole tarvetta yhtä yksityiskohtaiselle suunnittelulle, kuin vanhemmilla järjestelmillä. (Thiele & Nebeling 2007, 6.)

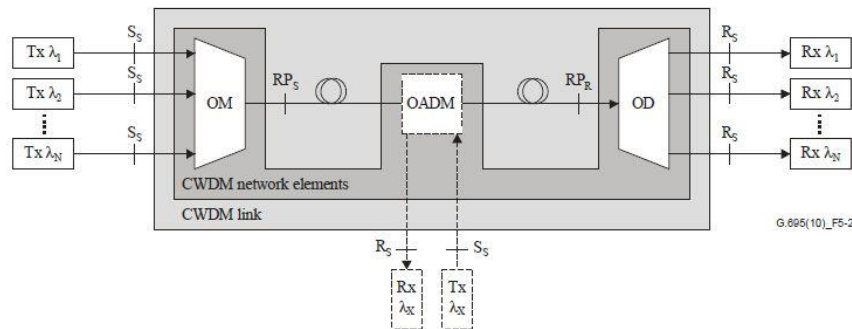


Kuva 12. Musta laatikko –mallin mukainen kaksisuuntainen linkki (ITU-T G.695 2010, 6)

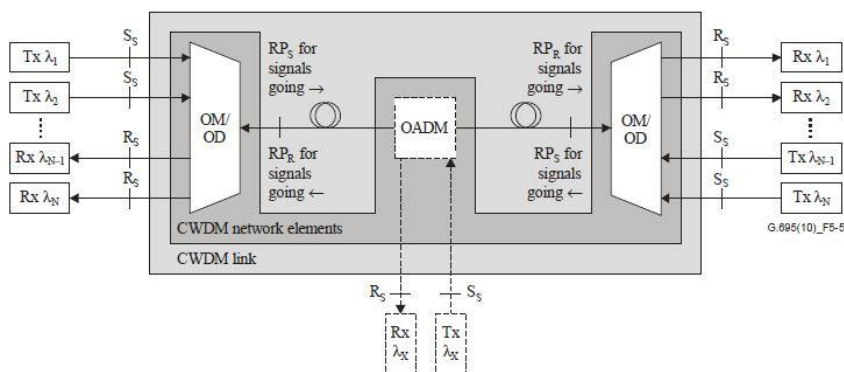
Musta linkki -konseptilla kuvattiin G.695-standardissa muxerin, optisen kuitukaapelin, demuxerin, optisten liittimien, yhdyskaapelin ja muiden liittimien yhteenliittämistä. Musta linkki -malli mahdollistaa sen, että optiset ominaisuudet voidaan määritellä yhdessä kanavassa CWDM-lähetin-vastaanottimen tai Gigabit-liitäntäsovittimen, ja muxerin sisääntulojen ja demuxerin ulosmenojen välillä. G.695-standardissa ei

määritellä muxerin tai demuxerin ominaisuuksia, joten musta linkki -mallilla voidaan mux- ja demux-parin syöttöhäviöt optimoida jokaiselle aallonpituudelle. Esimerkiksi 1470 nm:n aallonpituudella signaalin vaimennus on suurempi, kuin 1550 nm:n aallonpituudella, mutta musta linkki -toteutuksella voidaan 1470 nm aallonpituuden vaimennus optimoida ja saada jopa pienemmäksi kuin 1550 nm:n aallonpituudella. Näin pystytään saavuttamaan suurimmat mahdolliset lähetysetaisyudet linkeille. Jokaisen linkin optimointi vaatii kuitenkin yksityiskohtaiset laskelmat, jolloin verkon suunnittelu on vaikeampaa. (Thiele & Nebeling 2007, 7 – 8.)

G.695-standardissa kaikki yksisuuntaiset sovellukset on merkitty etuliitteellä S, Single Channel Interface Specifications. Kaksisuuntaiset sovellukset on merkitty etuliitteellä B, Bi-directional application. Yksisuuntaiset sovellukset tarvitsevat kaksi valokuitua linkin muodostamiseen. Kaksisuuntaiset sovellukset tarvitsevat vain yhden valokuidun, sillä ne pystyvät lähettämään molempiin suuntiin samaa valokuitua pitkin. (Thiele & Nebeling 2007, 8.)

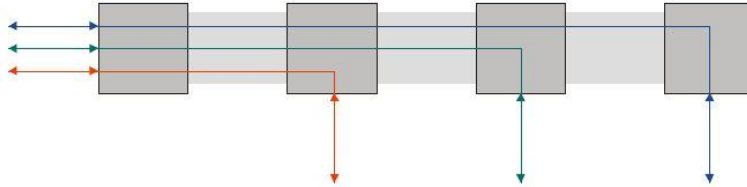


Kuva 13. Musta linkki -mallin mukainen yksisuuntainen linkki. (ITU-T G.695 2010, 5)

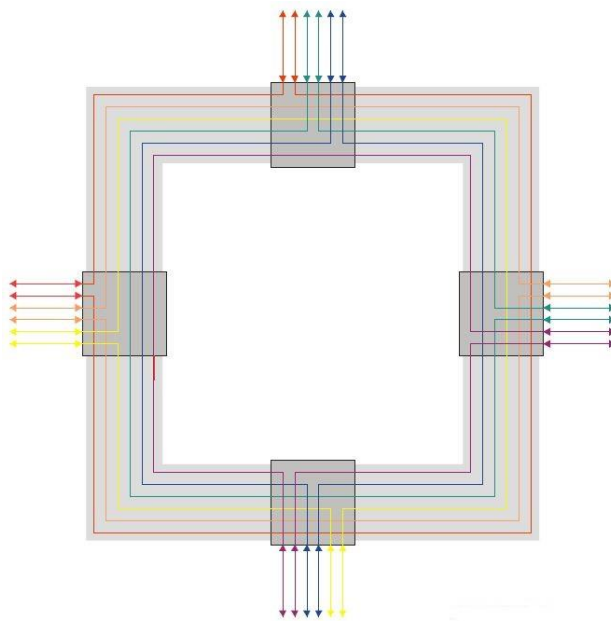


Kuva 14. Musta linkki -mallin mukainen kaksisuuntainen linkki. (ITU-T G.695 2010, 6)

G.695-standardissa määritellään topologioita CWDM-ketjuille linkittämällä ne yhteen OADM-laitteilla (Optical Add-Drop Multiplexer). Näin voidaan muodostaa lineaarisia CWDM-linkkiketjuja sekä optisia rengastopologioita. (Thiele & Nebeling 2007, 8.) Nämä molemmat ovat esitelty alla olevissa kuvissa.



Kuva 15. Lineaarinen musta linkki -mallin mukainen topologia (ITU-T G.695 2010, 53)



Kuva 16. Musta linkki -mallin mukainen rengastopologia (ITU-T G.695 2010, 53)

4.1.3 ITU-T G.671: Optisten komponenttien ja alijärjestelmien lähetysominaisuudet

ITU-T G.671-standardissa määritellään optisiin lähetyksiin liittyvät parametrit yleisesti telekommunikaatiojärjestelmissä käytössä oleville optisille komponenteille. Seuraavat komponentit ovat määriteltä: vaimentimet, haaroittimet, liittimet, eristimet, jatkokset, kytkimet, dispersiotasaimet, multiplekserit, demultiplekserit ja OADM-laitteet. (Thiele & Nebeling 2007, 15.)

4.2 CWDM kaupunkitietoverkoissa

Kaupunkien tietoverkoissa on käytetty CWDM-tekniikkaa jo vuodesta 1999 lähtien. Kaupunkialueiden tietoverkot kasvoivat nopeasti ja tarvittiin pienikustannuksinen plug-and-play -ratkaisu. Kaupunkialueet olivat operaattoreille mielenkiintoinen kohde myös siksi, että yrityksille suorituskykyisen verkon toimittaminen oli nopeaa. DWDM-tekniikka oli ensimmäinen vaihtoehto, jolla kaupunkiverkkoja alettaisiin toteuttaa. DWDM-tekniikkaa oli käytetty pitkän matkan verkkojen rakentamiseen, jonka takia se olisi ollut selkeä valinta. DWDM-tekniikka osoittautui kuitenkin liian kalliiksi lyhyilläkin etäisyyksillä ilman vahvistimia. Pienet Internet-operaattorit valitsivat täten CWDM:n lyhyen matkan toteutuksiin. (Thiele & Nebeling 2007, 252.)

Kaupunkiverkot ovat liityntäsolmu loppukäyttäjille. Kaupunkiverkoissa kasvupotentiaalia on enemmän kuin missään muualla. Kaupunkiverkoissa kuljetetaan monia eri protokollia lyhyillä matkoilla, esimerkiksi T1, SONET, kuitukanava, Ethernet, ATM ja ESCON. Tästä syystä vaatimukset verkolle ovat tiukat. Kaupunkiverkoissa käytetään lyhyitä rengas- tai pisteestä pisteeseen -topologioita, joissa kuljetetaan 4 – 16 aallonpituutta. Tiedonsiirtonopeuden vaihtelevat 100 Mb/s – 2,5 Gb/s välillä. CWDM-tekniikka soveltuu erittäin hyvin käytettäväksi kaupunkiympäristöissä. Koska valokuidun asentaminen on liian kallista, pystytään CWDM:n avulla kuljettamaan useita aallonpituuksia käyttäen jo olemassa olevia valokuituja rakennusten välillä. (Thiele & Nebeling 2007, 253.)

Internet-operaattoreilla ja tietoverkkojen suunnittelijoilla on useita haasteita kaupunkien tietoverkkoja rakennettaessa. Näihin haasteisiin kuuluu skaalautuvuus, suojaus, läpinäkyvyys ja liitettävyys. Oletuksena on, että tietoverkko tulee tarvitsemaan lisää kaistanleveyttä tulevaisuudessa ja kustannussyistä uusien valokuitujen lisääminen olemassa olevaan verkkoon ei ole mahdollista. (Thiele & Nebeling 2007, 259 – 260.)

Skaalautuvuus CWDM-tekniikalla on yksinkertaista. Pisteestä pisteeseen linkki voidaan muodostaa ainoastaan kahta CWDM-aallonpituutta käyttämällä. Nämä kaksi aallonpituutta kytketään 16-kanavaiseen CWDM-multiplekseriin ja demultiplekseriin. Kun tarvitaan lisää kaistanleveyttä, niin aallonpituuksia voidaan lisätä. Aallonpituuksia lisätään yleensä neljän, kahdeksan tai 16 ryhmissä. (Thiele & Nebeling 2007, 260.)

Suojaus saavutetaan tekemällä tietoverkosta redundanttinen. Kun tietoverkossa tapahtuu häiriö, niin tietoa pystytään silti kuljettamaan kaikkialle. Rengas-verkossa valokuidun katkeaminen olisi katastrofi, jos redundanttista polkua ei olisi olemassa. Yksi tapa suunnitella redundanttinen verkko on käyttää OADM-Ethernet -kytkimiä, jotka tarkkailevat tiedonkulkua virheiden varalta. Jos kytkin huomaa, että kuitulinkki ei toimi oikein, se alkaa reitittää rengasverkon toiseen suuntaan. (Thiele & Nebeling 2007, 261.)

Läpinäkyvyydellä tarkoitetaan yhteensopivuutta useiden eri protokollien kanssa. Sen sijaan, että jokainen signaali muunnettaisiin jakamaan yhteinen lähetysprotokolla, on usein käytännöllisempää kuljettaa jokainen signaali omaa aallonpituutta pitkin ja yhdistää nämä signaalit CWDM-tekniikalla. Koska jokainen aallonpituus on erillään muista aallonpituuksista, pystytään signaalit kuljettamaan ilman, että muut signaalit aiheuttaisivat niihin häiriöitä. (Thiele & Nebeling 2007, 261.)

Liitettävyydelle asetettavat vaatimukset vaativat tarkkoja suunnitelmia. Näihin vaatimuksiin kuuluu muun muassa linkkibudjetti ja passiivinen optinen eristys. Kaupunkiverkoissa linkkibudjetti ja vaimennus ovat tärkeimmät tekijät, joiden mukaan määritellään suurin mahdollinen etäisyys pisteestä pisteeseen linkeille. Linkkibudjetti on lähetin-vastaanottimen lähetysteho sekä vastaanottimen herkkyys. Esimerkiksi, useimpien CWDM-lähetin-vastaanottimien lähetysteho on 1,0 dBm ja APD-vastaanottimien herkkyys on -29,0 dBm 2,5 Gb/s tiedonsiirtonopeudella. Tällöin linkkibudjetti lähettimen ja vastaanottimen välillä on 30 dB. (Thiele & Nebeling 2007, 262.)

4.3 Lähetin-vastaanottimet

Tavallisimmin käytössä oleva digitaalinen laserlähetin rakentuu ohjainpiiristä, joka moduloi laseria, tarkkailufotodiodista ja automaattisesta tehonhallintayksiköstä. (Thiele & Nebeling 2007, 72.) Suurin ero järjestelmän optisiin komponentteihin liittyen CWDM- ja DWDM-järjestelmien välillä on se, että CWDM-järjestelmissä voidaan käyttää jäähdyttämättömiä DFB-laserlähteitä. Tämän ansiosta CWDM-lähettimet ovat yksinkertaisempia, kuin DWDM-lähettimet. (Thiele & Nebeling 2007, 73.)

Jäähdyttämättömiä DML-laitteita käytetään CWDM-järjestelmien siirtolinkeissä. Koska lähettämiä ei tarvitse jäähdyttää, niiden käyttämisessä on monia etuja: jäähdytysjärjestelmää ei tarvita, yksinkertaisemmat ohjauspiirit, pienempi virrankulutus ja pienempi hinta. Näillä laitteilla on kuitenkin omat ongelmansa: Yksinkertaisten lähetinten suora modulaatio johtaa levinneeseen viivaleveyteen, laserien aallonpituuspoikkeamaa täytyy muokata sekä lämpötilanvaihteluista aiheutuvan virransyötön vaihtelun täytyy olla pieni. (Thiele & Nebeling 2007, 74.)

Yksinkertainen optinen vastaanotin koostuu kahdesta yksiköstä: havaitsimesta ja vahvistimesta. Optiset vastaanottimet voidaan luokitella kahteen eri luokkaan riippuen havaitsimen tyypistä: PIN- ja APD-vastaanottimiin. APD-vastaanotinpiirit ovat herkempiä ja sallivat suuren linkkibudjetin, joka mahdollistaa vahvistamattomat lähetykset ja suuren komponenttihäviöbudjetin, joka tekee niistä ihanteelliset CWDM-järjestelmissä käytettäväksi. APD-vastaanotinpiirit soveltuvat käytettäväksi myös aallonpituuksilla, joilla optisia vahvistimia ei ole saatavilla. APD-piirit ovat erittäin herkkiä: niiden herkkyys on parempi kuin -30 dBm 2,5 Gb/s vastaanottimilla ja -24 dBm 10 Gb/s vastaanottimilla. PIN-vastaanotinpiirejä voidaan käyttää havaitsemiseen useimmilla bittinopeuksilla, mukaanlukien suuremmat kuin 10 Gb/s nopeudet. CWDM-järjestelmissä yleisin käytetty bittinopeus on kuitenkin 1,25 – 2,5 Gb/s. PIN-vastaanotinpiirejä käytetään eniten, kun kustannukset täytyy pitää alhaisina. PIN-piirit eivät ole yhtä herkkiä, kuin APD-piirit. PIN-piirien herkkyys on -16 dBm 10 Gb/s – vastaanottimilla ja -22 dBm 2,5 Gb/s-vastaanottimilla. (Thiele & Nebeling 2007, 77 – 78.)

Nykyään kaikki yllä mainitut toiminnot integroidaan yhteen moduuliin, jota kutsutaan lähetin-vastaanottimeksi. Lähetin-vastaanottimet ovat erityisesti hyödyllisiä, kun käytetään kaksisuuntaisia linkkejä, koska jokainen moduuli sisältää lähetimen ja vastaanottimen. CWDM-lähetin-vastaanottimissa käytetään yleisimmin DFB-lasereita ja PIN-vastaanottimia niiden yksinkertaisuuden ja hinnan takia. Lähetin-vastaanottimet asennetaan siten, että ne kytkeytyvät elektronisesti suoraan kytkintauluun. Yleisimmin käytetyt optiset liittimet ovat joko LC- tai SC-liittimiä. (Thiele & Nebeling 2007, 79.)

Kun tarve tiheämpivälisille linkeille nousi, piti alkaa keksiä keinoja pienentää lähetin-vastaanottimien fyysistä kokoa. Small Form Factor -lähetinvastaanottimia alettiin

käyttää LC-, MT-RJ- ja MU-liittimillä. SFF-lähetin-vastaanottimet olivat ensimmäisiä pienikokoisia lähetin-vastaanottimia. Nämä lähetin-vastaanottimet olivat kooltaan vain puolet SC-tyyppisten lähetin-vastaanottimien koosta. (Thiele & Nebeling 2007, 83.)

Lähetin-vastaanottimista haluttiin tehdä liittintyyppisiä, jotta lähetin-vastaanottimissa olisi mahdollista käyttää useita optisia liittytärärajapintoja. Ethernet-tekniikassa alettiin nopeasti hyödyntää tätä GBIC-lähetin-vastaanottimilla (Gigabit Interface Converter). GBIC-lähetin-vastaanotin on mahdollista kytkeä suoraan elektronisesti esimerkiksi kytkimeen. GBIC-lähetin-vastaanottimet olivat ensimmäisiä optisia laitteita, joissa käytettiin herkempää APD-vastaanotinta PIN-vastaanottimen sijasta. (Thiele & Nebeling 2007, 84.)

SFP, eli Small Form Pluggable –lähetin-vastaanottimet yhdistivät SFF- ja GBIC-lähetin-vastaanottimien hyvät puolet: SFP-lähetin-vastaanottimet voidaan kytkeä suoraan elektronisesti ja ne ovat pienikokoisia. SFP-lähetin-vastaanottimien tehohäviö on myös pienempi kuin GBIC-lähetin-vastaanottimilla, sillä SFP:t toimivat 3,3 V jännitteellä, kun taas GBIC:t toimivat 5 V jännitteellä. SFP-lähetin-vastaanottimia voidaan käyttää Gigabit Ethernetissä ja 2,5 Gb/s SONET-sovelluksissa. SFP-lähetin-vastaanottimia on kehitetty myös 1 Gb/s, 2 Gb/s ja 4 Gb/s kuitukanavia varten. (Thiele & Nebeling 2007, 85.)

Seuraava kehitysaskel oli 10 Gb/s lähetin-vastaanottimet. IEEE (Institute of Electronic and Electrical Engineering) on määritellyt standardissa IEEE 802.3 ae-2002 tavat näiden laitteiden CWDM käyttöä varten. 10 Gb/s sarjaliitännän sijasta IEEE 802.3 ae-2002 standardissa on määritelty, että lähetin-vastaanotin lähettää ja vastaanottaa neljä signaalia eri aallonpituuksilla: 1275, 1300, 1325, 1350 nm. IEEE 802.3 ae-2002 standardin 25 nm aallonpituusväli eroaa hieman ITU:n käyttämästä 20 nm aallonpituusvälistä. Jokainen näistä neljästä kanavasta toimii 3,125 Gb/s nopeudella, jolloin kokonaiskaistanleveydeksi tulee 12,5 Gb/s. Lähettämällä neljä signaalia vain yhden sijasta saavutetaan suurempi lähetysetaisyys ja parempi dispersion sietokyky. Lähetin-vastaanotinten hinta on myös alempi, sillä niissä on mahdollista käyttää halvempia lasereita ja havaitsimia. (Thiele & Nebeling 2007, 85-86.)

Tulevaisuuden haasteina tulee olemaan edelleen tiedonsiirtonopeuksien kasvattaminen, dispersion vähentäminen ja hallitseminen. (Thiele & Nebeling 2007,

86). QSFP, eli Quad Small Form Pluggable –lähetin-vastaanottimia on nykyään saatavilla 40 Gb/s bittinopeudella. Tämä nopeus on saavutettu multipleksaamalla neljä 10 Gb/s signaalia yhdeksi 40 Gb/s signaaliksi. Signaalien multipleksaaminen ja demultipleksaaminen hoidetaan QSFP-lähetin-vastaanottimen sisällä. (Cisco 40GBASE QSFP+ Modules, 2012, 1 – 2.) SFP-lähetin-vastaanottimet mahdollistavat optisen tietoverkon rakentamisen CWDM-tekniikan avulla yksinkertaisesti sekä hintatehokkaasti. Nykytilassaan SFP-lähetin-vastaanottimet kuitenkin rajoittavat CWDM-tekniikan käyttöä. Jotta CWDM-tekniikalla voitaisiin vastata uusiin vaatimuksiin, täytyisi uusien lähetin-vastaanotinkonseptien tulla käytettäväksi CWDM-tekniikalla. (Thiele & Nebeling 2007, 86.)

Linkkien kaistanleveyden noustessa, on johtanut monikanavaisten lähetinten ja vastaanotinten kehitykseen. Tällaisissa laitteissa on tyypillisesti monta laserlähdettä, integroitu monikanavainen ajuripiiri sekä piiri vastaanottimessa, joka uudelleengeneroi ja uudeelleenajastaa signaalin. Useiden aallonpituuslähetinten integroiminen optisten multipleksereiden ja pitkän matkan demultipleksereiden kanssa tulee olemaan haasteellista. Haasteena tulee olemaan jäähdytys, ylikuuluminen ja fyysinen koko. Lopullinen päämäärä olisi saada kehitettyä 16-kanavainen lähetin-vastaanotin, jossa kaikki vaadittavat optiset komponentit ovat integroitu yhteen moduuliin. (Thiele & Nebeling 2007, 88.)

4.4 Vahvistimet

Vahvistimien ansiosta optisessa tiedonsiirrossa on tullut nopeita edistysaskelia. Pääosin tästä on kiittäminen EDFA-kuituja eli erbiium-rikastettuja kuituja. Tämä kehitys mahdollisti lähetysmatkojen moninkertaistumisen ja linjakapasiteetin nousemisen suuresti. Linjavahvistimia asetetaan noin 80 kilometrin välein kuituun, jolloin signaali uudelleengeneroidaan yhtäaikaaisesti kaikille aallonpituuksille. Lähetysetaisyydet eivät enää ole niinkään riippuvaisia signaalitehosta, vaan vahvistimen häiriöistä ja lähetyshäiriöistä, kuten kromaattisesta dispersiosta ja kuidun epälineaarisuudesta. Ennen jokaiselle aallonpituuskanavalle tarvittiin oma uudelleengenerointilaite (vastaanotin-lähetin). Nykyään yhtä vahvistinta voidaan käyttää uudelleengeneroimaan monta kanavaa kerralla, jolloin hintakustannukset kanavaa kohden laskevat. (Thiele & Nebeling 2007, 171 – 172.)

Vahvistetut CWDM-järjestelmät eivät ole vielä kuitenkaan yleistyneet.

Järjestelmäsuunnittelijat pyrkivät kaventamaan aukkoa CWDM- ja DWDM-järjestelmien välillä. Tätä aukkoa voidaan pienentää käyttämällä kuituvahvistimia, jotka ovat melko kalliita ja monimutkaisia, mutta niiden avulla saavutetaan laadukas vahvistus. SOA-vahvistimet ovat halvempi ratkaisu ja soveltuvat sen takia paremmin CWDM-järjestelmissä käytettäväksi, mutta niiden suorituskyky ei ole yhtä hyvä kuin kuituvahvistimien. SOA-vahvistimien suurin suorituskykyä rajoittava tekijä on niiden rajoitettu lähtöteho. (Thiele & Nebeling 2007, 194.)

4.4.1 Optisen vahvistuksen periaate

Optinen vahvistin toistaa tulevat fotonit prosessilla, josta käytetään nimitystä stimuloitu emissio. Myös laserien valo tuotetaan stimuloidulla emissiolla.

Ihanteellinen vahvistin nostaisi signaalin tehoa ilman minkäänlaisia haitallisia ominaisuuksia. Todellisuudessa tällaisilta ominaisuuksilta ei kuitenkaan välttyä. Spontaaninen emissio, joka on yhteydessä stimuloituun emissioon, nostaa optista kohinatasoa, joka huonontaa signaalia. (Thiele & Nebeling 2007, 172.)

4.4.2 Vahvistuksen haasteet ja toteutus

Vahvistimien käyttöön CWDM-järjestelmissä liittyy monia haasteita. Vahvistimien valmistaminen on hankalaa, sillä vahvistimien täytyisi CWDM-järjestelmässä kattaa paljon suurempi kaistanleveys, kuin DWDM-järjestelmissä käytettävissä vahvistimissa. Toinen haaste on se, että kohinan taso nousee kun kaistanleveyttä nostetaan. DWDM-järjestelmissä suurin osa kohinasta poistuu kapean päästösuotimen ansiosta, jolloin kohina jolla on merkitystä, syntyy signaalipulssista itsestään. CWDM-järjestelmissä täytyy käyttää leveämpiä päästösuotimia, jolloin kohinaa pääsee enemmän vastaanottimelle. CWDM-standardin mukaan aallonpituuskanavien väli on 20 nm ja kanavien aallonpituudet voivat vaihdella korkeintaan 13 nm. Tällöin tarvitaan suotimia, joilla on 13 nm:n päästökaista. 13 nm päästökaistalla optisesta vahvistuksesta syntyvä kohina kulkeutuu vastaanottimelle. (Thiele & Nebeling 2007, 177 – 178.)

Vahvistus voidaan CWDM-linkeissä toteuttaa monella eri tavalla: esivahvistus, jälkivahvistus tai molemmat. Linjavahvistusta ei yleensä käytetä, sillä se vaatii ylimääräisen virransyöttöpaikan. Esi- ja jälkivahvistuksen käyttö on erittäin

käytännöllistä silloin, kun lähettimet tai vastaanottimet voidaan liittää vahvistimiin käyttäen kanavamultipleksereitä ja vahvistimet voidaan liittää valokuituun käyttämällä aallonpituusmultipleksereitä. Vahvistimia voidaan käyttää samalla tavalla OADM-laitteiden kanssa. Jälkivahvistusta käytettäessä tulee muistaa, että johtuen leveästä kaistanleveydestä johtuvasta kohinasta joka pääsee vastaanottimelle, linkin vahvistus on pienempi kuin vahvistimen. (Thiele & Nebeling 2007, 193.)

4.4.3 Erbium-rikastetut valokuidut

Erbium-rikastetut valokuidut ovat tunnetuimpia harvinaisilla maametalleilla rikastetuista valokuiduista. Kuitu rikastetaan harvinaisella maametallilla ja kuidussa kulkeva valo kiihdyttää metalliatomit, jolloin ohi kulkeva fotoni aiheuttaa stimuloidun emission, kun sen aallonpituus vastaa energiaeroihin atomin energiatasojen välillä. Erbium on suosittu rikastuselementti koska sen energiatasot ovat sellaiset, että vahvistus tapahtuu pienihäviöisessä aallonpituusikkunassa noin 1550 nm:n kohdalla. Erbium-rikastetuilla kuiduilla vahvistus tapahtuu noin 1530 – 1565 nm:n välillä, joka tunnetaan nimellä C-alue. Vahvistusalueeksi saadaan 1565 – 1610 nm:n L-alue valitsemalla oikeanlaiset vahvistus- ja laserpumpputasot. S-alueen vahvistimia on myös olemassa, jotka tarjoavat 20 nm:n vahvistuksen. (Thiele & Nebeling 2007, 173.)

Yksinkertaisimmillaan erbium-rikastettu kuitu koostuu kymmeniä metrejä pitkstä erbium-rikastetusta kuidusta, 980 nm tai 1480 nm pumppulaserista ja aallonpituusriippuvaisesta yhdistimestä, joka multipleksaa signaalin ja pumppuaallonpituuden. Muita harvinaisia maametalleja on mahdollista käyttää C- ja L-alueiden ulkopuolella olevien aallonpituuksien vahvistamiseen. Näiden käyttäminen ei kuitenkaan ole helppoa tavallisessa kvartsiytimisessä kuidussa tai niiden käyttämisestä tulee muita ongelmia, kuten monimutkaiset pumppujärjestelmät. (Thiele & Nebeling 2007, 173.)

4.4.4 Optiset puolijohdevahvistimet

Optisissa puolijohdevahvistimissa on samankaltainen rakenne kuin puolijohdelasereissa. Puolijohdevahvistin koostuu vahvistuspiiristä aktiivisella aallonjohtimella, jonka molempiin päihin on yhdistetty valokuituja. Erbium-rikastetuissa kuiduissa vahvistus tapahtuu stimuloidulla emissiolla, mutta optisissa puolijohdevahvistimissa vahvistus aiheutuu aukoista puolijohteen johtumis- ja

valenssialueilla sekä elektronien uudelleenyhdistämisestä. Vahvistinpiiri sisältää valon- ja virransyötön. Virransyöttö kiihdyttää elektronit johdinalueella, joka aiheuttaa valosäteilyä. Puolijohdevahvistimissa tyypillisesti käytetty vahvistava materiaali on indium gallium arsenidi fosfidia (InGaAsP). Tätä materiaalia voidaan käyttää aallonpituusvälillä 900 – 1650 nm, eli koko CWDM-aallonpituusaluetta on mahdollista käyttää. (Thiele & Nebeling 2007, 173 – 174.) Kun käytetään esivahvistusta SOA-vahvistimilla, täytyy häiriöitä rajoittaa vahvistuskompression takia. Tästä syystä SOA-vahvistimien lähtötehoa joudutaan rajoittamaan. (Thiele & Nebeling 2007, 194.)

4.4.5 Raman

Raman-vahvistus tapahtuu valokuidussa, mutta se ei ole riippuvainen harvinaisista maametalleista. Sen sijaan sen toiminta perustuu epälineaariseen kanssakäymiseen signaalin ja suuritehoisen optisen pumpun välillä. Stimuloitua Raman-hajontaa tapahtuu, kun signaalin fotonit aiheuttaa joustamatonta suurempitehoisen pumpun fotonin hajontaa, jolloin syntyy toinen signaalifotoni ja ylimääräinen energia häviää lämpönä. Raman-vahvistus on todettu hyödylliseksi DWDM-järjestelmissä, sillä valokuitua itsessään voidaan käyttää vahvistavana väliaineena. Signaalitehoa voidaan nostaa, ennen kuin se saavuttaa vahvistusalueen, jolloin signaalin kohinataso on pientä. (Thiele & Nebeling 2007, 174.)

4.4.6 Kohina

Stimuloidulla emissiolla saavutetaan haluttu vahvistus, mutta aina kun signaalia vahvistetaan, syntyy myös häiriöitä. Kaikki optiset vahvistimet tuottavat ylimääräisiä fotoneja. Kaikki ylimääräiset fotonit, jotka yhdistetään signaalin kanssa, tulevat myöhemmin myös vahvistumaan, jolloin signaalin kohinataso nousee. Kohinan takia taso, jolla signaali voidaan onnistuneesti tulkita, laskee. (Thiele & Nebeling 2007, 175.)

Kohinan voimakkuus pystytään määrittämään käyttäen seuraavaa kaavaa: $NF = 2n_{sp}/\eta_i$. Kaavassa $n_{sp} = N_2/(N_2 - N_1)$ ja η_i on kaikkien signaalihäviöiden summa vahvistimen sisääntulosta vahvistusväliaineen alkuun. Erbium-rikastetuilla kuiduilla häviöt koostuvat ainoastaan isolaattorista, pumppuyhdistimestä ja liittäjästä, joka yhdistää syöttökuidun ja erbium-rikastetun kuidun. Näiden häviöiden summa on tyypillisesti

pieni, jolloin erbiium-rikastettujen kuitujen NF-arvo on noin 4 dB. Halvoissa sovelluksissa NF-arvo voi kuitenkin olla 6 dB. SOA-vahvistimissa NF-arvo on tyypillisesti 6 – 7 dB. Raman-vahvistimissa valokuitu itsessään on vahvistusväliaine, jolloin syöttöhäviö voi olla lähellä nollaa. Tästä syystä raman-vahvistimilla voidaan päästä lähelle teoreettista 3 dB:n vahvistusmaksimia. Koska raman-vahvistus alkaa ennen pumppualueetta, saattaa NF-arvo kyseisellä alueella olla jopa negatiivinen. (Thiele & Nebeling 2007, 175 – 176.)

Tärkeimmät asiat, jotka täytyy ottaa huomioon vahvistettua järjestelmää suunnitellessa, ovat vastaanottimelle pääsevä leveästä kaistasta johtuva kohina sekä puolijohdevahvistimia käytettäessä vahvistuskompressio. Näistä ongelmista huolimatta vahvistimien avulla linkkibudjettia voidaan huomattavasti kasvattaa CWDM-järjestelmissä. (Thiele & Nebeling 2007, 194.)

4.5 CWDM-järjestelmien aallonpituudet

CWDM-tekniikka vaatii suuren aallonpituuskaistanleveyden, johtuen sen harvasta 20 – 25 nm:n kanavavälistä. ITU-T G.694-standardi määrittelee CWDM-tekniikan käytössä olevat aallonpituudet seuraavasti: O-, E-, S-, C- sekä L-aallonpituusalue. (Thiele & Nebeling 2007.)

Taulukko 3. CWDM-aallonpituusalueet (Thiele & Nebeling 2007.)

| | λ |
|--------|-----------|
| O-alue | 1260-1360 |
| E-alue | 1360-1460 |
| S-alue | 1460-1530 |
| C-alue | 1530-1565 |
| L-alue | 1565-1625 |

Kuten ylläolevasta taulukosta käy ilmi, on E-alueella viisi aallonpituuskanavaa. E-kanavaa ei kuitenkaan normaalisti käytetä G.652-tyypin valokuitua käytettäessä. Syy tähän on se, että vesipiikki osuu juuri E-kanavan alueelle. (Thiele & Nebeling 2007.)

5 DWDM

Dense Wavelength-Division Multiplexing eli tiheä aallonpituuskanavointi on samankaltainen tekniikka kuin CWDM. DWDM-tekniikalla käytetään paljon tiheämpää kanavaväliä kuin CWDM-tekniikalla, joka onkin nämä kaksi tekniikkaa toisistaan erottava suurin tekijä. DWDM:llä on mahdollista siirtää useita terabittejä tietoa sekunnissa valokuitua kohden. DWDM-tekniikan käyttämä hyvin tiheä kanavaväli asettaa laitteistolle tiettyjä vaatimuksia.

WDM-tekniikassa määritellään CWDM- ja DWDM-tekniikat seuraavasti. Jos järjestelmässä käytetään yli 40 aallonpituutta, on kyseessä DWDM-järjestelmä. Jos käytetään 8 – 32 aallonpituutta, on kyseessä CWDM-järjestelmä. (Kartalopoulos 2002, 299.)

5.1 DWDM-järjestelmät ja standardit

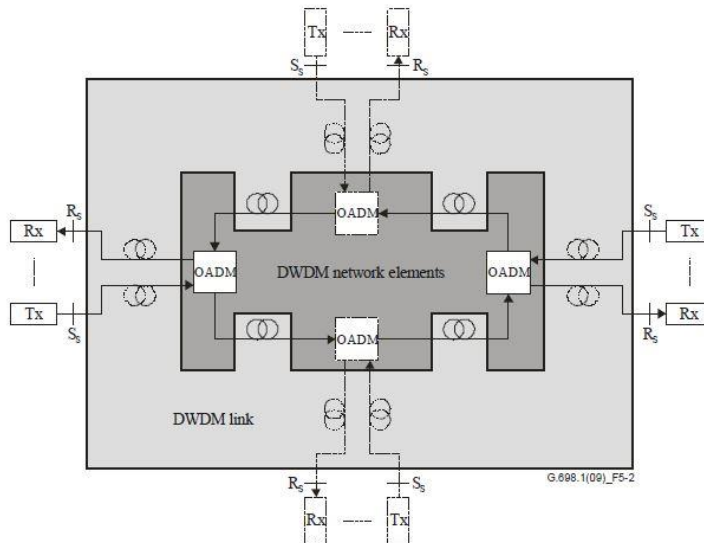
DWDM-järjestelmiä voidaan soveltaa monentyyppisiin tietoverkkoihin. Niitä voidaan käyttää pitkän matkan siirtoverkoissa, runkoverkoissa, laajoissa kaupunkitietoverkoissa, keski- ja pienikokoisissa LAN-verkoissa ja pääsyverkoissa, joihin asiakkaat kytkeytyvät, esimerkiksi FTTH ja FTTC. (Kartalopoulos 2002, 298.)

Pisteestä pisteeseen DWDM-linkeissä kuljetetaan tyypillisesti muutamia tai useita aallonpituuksia yhtä valokuitua käyttäen. Tällaisissa lyhyen matkan, noin kahden kilometrin linkeissä voidaan käyttää monimuotovalokuidulla 16 – 40 aallonpituutta, joista jokainen toimii 1,25 – 10 Gb/s nopeudella. Useiden satojen kilometrien linkeissä kuljetetaan 80 – 160 tai enemmän aallonpituuksia, jotka jokainen toimivat korkealla 10 – 40 Gb/s tai korkeammalla tiedonsiirtonopeudella. (Kartalopoulos 2002, 296.) Jos kuljetetaan 160 aallonpituutta, jotka toimivat 40 Gb/s tiedonsiirtonopeudella saadaan kuidun kokonaiskapasiteetiksi 6,4 Tb/s.

5.1.1 ITU-T G.698.1: Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces

ITU-T G.698.1 -suositus määrittelee fyysisen kerroksen liityntäporttien optiset arvot DWDM-järjestelmille käytettäväksi pääosin kaupunkitietoverkoissa. Tässä suosituksessa käsitellään yksisuuntaiset DWDM-sovellukset, jotka toimivat 2,5 ja 10 Gb/s nopeuksilla 100 GHz kanavavälillä. Suosituksessa käsitellään myös OADM-

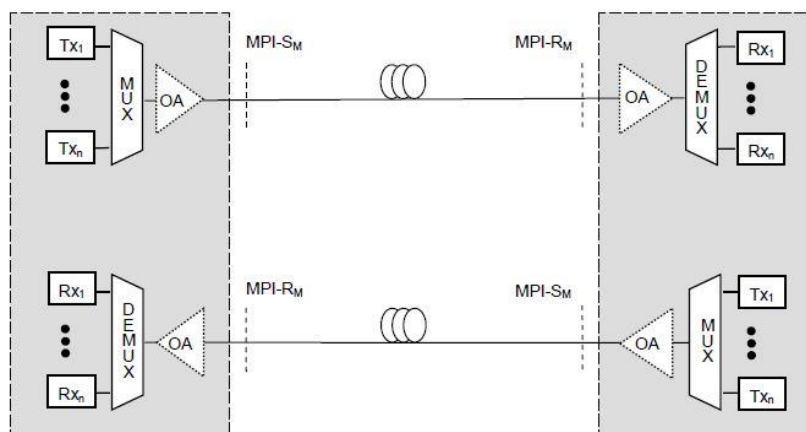
laitteet mustan linkin sisällä sekä musta linkki -sovelluksille niiden suurin sallittu vaimennus, kromaattinen dispersio, sironta- ja polarisaatiodispersio. (ITU-T G.698.1 – 3, 2010.)



Kuva 17. Rengas musta linkki -sovellus. (ITU-T G.698.1, 4)

5.1.2 ITU-T G.973.1 Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fibre submarine cable systems

ITU-T G.973.1 -suositus määrittelee fyysisen kerroksen ominaisuudet toistimettomille vedenalaisille DWDM-järjestelmille. Suosituksessa käsitellään pisteestä pisteeseen ja monilinjaiset pumputtomat järjestelmät. (ITU-T G.973.1 2009, 1.)



Kuva 18. Toistimeton pisteestä pisteeseen linkki. (ITU-T G.973.1, 3)

Taulukko 4. Vedenalaisissa järjestelmissä käytettävät kuitutyypit.

| |
|---------------------------|
| SMF-kuitu (ITU-T G.652) |
| DSF-kuitu (ITU-T G.653) |
| CSF-kuitu (ITU-T G.654) |
| NZDSF-kuitu (ITU-T G.655) |
| WNZDF-kuitu (ITU-T G.656) |
| PDF-kuitu |
| NDF-kuitu |
| LEF-kuitu |
| DCF-kuitu |

Yllä mainituille kuiduille on määritelty suurin sallittu vaimennus kyseisen kuidun suosituksessa. Lisää tietoa näistä kuiduista löytyy suosituksesta ITU-T G.678. Suurin sallittu vaimennus 1550 nm:n kuiduilla on 0,22 – 0,4 dB/km. Tulee ottaa huomioon, että vedenalaiset järjestelmät saattavat vaatia pienemmän vaimennuskertoimen. Järjestelmän vaatimuksista riippuen usean tyyppisiä kuituja voidaan käyttää yhdessä järjestelmän oikein toimimisen varmistamiseksi. (ITU-T G.973.1, 4 – 5.)

Vedenalaisten optisten järjestelmien luotettavuus määritellään korjausta vaativien ongelmien määrällä järjestelmän elinkaaren aikana sekä järjestelmän elinkaaren pituudella. Yleisesti järjestelmän elinkaaren aikana tavoitteena on vähemmän kuin yksi korjausta vaativa virhe. Vedenalaisten optisten järjestelmien elinkaaren kesto on yleensä noin 25 vuotta. Vedenalaisten järjestelmien kapasiteettia voidaan nostaa nostamalla aallonpituuskanavien tiedonsiirtonopeutta tai lisäämällä aallonpituuskanavien määrää. Näin pystytään helpommin saavuttamaan tavoiteltu 25 vuoden elinkaari. (ITU-T G.973.1, 4 – 7.)

5.1.3 Pisteestä pisteeseen DWDM-järjestelmät

Pisteestä pisteeseen DWDM-järjestelmät voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: pitkän-, keskipitkän- ja lyhyen matkan järjestelmiin. Pitkän matkan DWDM-järjestelmät on tarkoitettu yhdistämään kaksi eri mantereilla sijaitsevaa suurkaupunkia ja kuljettamaan erittäin suuria määriä tietoliikennettä. Tällaisista järjestelmistä käytetään termiä ultra-long haul, eli erittäin pitkän matkan järjestelmä. ULH-järjestelmiä käytetään nykyään valtamerten välisissä yhteyksissä. (Kartalopoulos 2002, 354.)

Pitkän matkan pisteestä pisteeseen järjestelmän halutaan tukevan hintatehokkaasti ja luotettavasti suurta määrää aallonpituuksia. Aallonpituuksia pitää pystyä kuljettamaan yhdessä valokuidussa 80 tai 160. Järjestelmän pitää tukea hyvin korkeita 10 tai 40 Gb/s kanavatiedonsiirtonopeuksia ja RZ- tai NRZ-modulaatiota. Useiden protokollien, kuten SONET, IP, ATM ja GbE yhtäaikaisten siirtäminen täytyy myös olla mahdollista. Tyypillinen siirtoetäisyys pitkän matkan järjestelmillä on jopa yli 4000 km. EDFA- ja Raman-vahvistus sekä dispersion hallintamoduulit mahdollistavat näin pitkien matkojen tiedonsiirron. Järjestelmässä käytetään mahdollisimman pieni määrä vahvistimia, dispersion hallintamoduuleja ja transpondereita. Englanninkielestä tulee transpondereille nimitys 3R-OEO (reshaping, retiming ja restoring). Transponderit muuntavat signaalin optisesta elektroniseksi ja uudelleen optiseksi. (Kartalopoulos 2002, 354 – 355.)

Keskipitkän matkan DWDM-järjestelmät ovat hyvin samankaltaisia kuin pitkän matkan järjestelmät, mutta niiden tiedonsiirtoetäisyys on lyhyempi, noin 1000 – 1500 km. Keskipitkän matkan järjestelmien vaatimukset ja ominaisuudet eivät ole yhtä tarkkoja kuin pitkän matkan järjestelmissä. Näissä järjestelmissä käytetään enemmän OADM-multipleksereitä ja lyhyemmän matkan takia aallonpituuskanavien siirtonopeudet saadaan helpommin suuriksi. (Kartalopoulos 2002, 357 – 358.)

Lyhyen matkan DWDM-järjestelmät puolestaan ovat yksinkertaisempia järjestelmiä kuin keskipitkän matkan järjestelmät, sillä niiden tiedonsiirtoetäisyys on 500 km tai alle. Lyhyen matkan järjestelmissä, kuten keskipitkän matkan järjestelmissä, käytetään paljon OADM-multipleksereitä ja yhdistetty kaistanleveys on suuri. (Kartalopoulos 2002, 358.)

5.1.4 DWDM-järjestelmät kaupunkitietoverkoissa

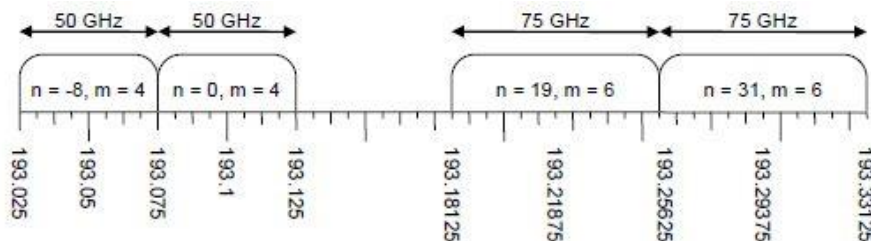
Kaupunkitietoverkoissa DWDM-järjestelmät koostuvat solmuista tähti-, verkko- tai rengas-topologiassa. Rengas-topologia voi olla yksittäinen, kaksinkertainen tai nelinkertainen riippuen tietoverkon koosta ja suojauspolitiikasta. Tyypillisesti pienet kaupunkisolmut tukevat yksittäistä rengas-topologiaa, keskikokoiset kaupunkisolmut kaksinkertaista ja suuret kaupunkisolmut nelinkertaista. Keskikokoisissa ja suurissa verkoissa puolet verkosta on varattu palvelua varten ja toinen puolikas on vikatilanteita varten. Hubeja käytetään yhdistämään tietoverkko toisiin samanlaisiin tai erilaisiin verkkoihin ja renkaan solmujen etäkäyttöön, jolloin voidaan hallita

aallonpituuksia ja solmun toimintaa. Yleisesti hubit hyväksyvät monia erilaisia protokollia, kuten TCP/IP, ATM, STM, LAN jne, jotka ovat jokainen matkalla yhteen tai useampaan renkaan solmuun. Tieto lähetetään hubista eteenpäin sille määrättyä aallonpituutta pitkin. (Kartalopoulos 2002, 362.)

Suuret DWDM-kaupunkitietoverkot koostuvat solmuista nelinkertaisessa rengas-topologiassa. Solmut tukevat 40 – 80 aallonpituutta valokuitua kohden, joista jokainen aallonpituus toimii 10 – 40 Gb/s tiedonsiirtonopeudella. Tällaiset optiset verkot kattavat alueita, joiden halkaisija on yli 1000 km, ja ne yhdistävät monia suurkaupunkeja. Signaalin vahvistaminen suurissa kaupunkitietoverkoissa on yhtä monimutkaista, kuin runkoverkoissa tai pitkän matkan yhteyksissä. Keskikokoiset DWDM-kaupunkitietoverkot käyttävät 40 aallonpituutta 2,5 – 10 Gb/s tiedonsiirtonopeudella. Nämä tietoverkot kattavat noin 500 km halkaisijan alueen. Dispersion hallintaa ei välttämättä tarvita tällaisissa verkoissa. Samankaltaista verkon suunnittelua voidaan soveltaa yritystietoverkkoihin, mutta käyttäen vähemmän solmuja. (Kartalopoulos 2002, 363 – 364.) Pienet kaupunkitietoverkot toteutetaan yleensä käyttäen CWDM-tekniikkaa ja ne kattavat noin 100 km halkaisijan alueet. Olen käsitellyt nämä tarkemmin kappaleessa 5.2.

5.2 DWDM-järjestelmissä käytettävät aallonpituudet

ITU-T G.694.1 -standardissa on määritelty nimelliset keskiaallonpituudet 12,5, 25, 50 ja 100 GHz kanavaväleille, joita voidaan käyttää sovellusten täsmentämiseen. Standardissa on myös määritelty joustavat kanavavälit. Joustavia kanavavälejä käytettäessä on mahdollista käyttää mitä tahansa kanavaväliä, kunhan kaksi kanavaa eivät mene päällekkäin. (ITU-T G.694.1, 2012, 2 – 5.)



Kuva 19. Kuvassa on esitelty joustavan kanavavälin käyttöä (ITU-T G.694.1 2012, 6)

5.3 Dispersion hallinta

Kun signaali etenee optisessa kuidussa ja optisten komponenttien läpi niin signaalissa tapahtuu dispersiota. Kun dispersion määrä nousee, niin bittihäiriöiden määrä nousee samalla ja signaalin teho tippuu. Dispersion määrä ei nouse suoraviivaisesti.

Kromaattisen dispersion takia 2,5 Gb/s tiedonsiirtonopeudella suurin mahdollinen tiedonsiirtoetäisyys on noin 1000 km, kun taas 10 Gb/s tiedonsiirtonopeudella etäisyys on noin 16 kertaa pienempi ja 40 Gb/s tiedonsiirtonopeudella jälleen 16 kertaa pienempi. Polarisaatiodispersio ei ole olennaista 2,5 Gb/s tiedonsiirtonopeudella, mutta 10 Gb/s tiedonsiirtonopeudella lähetysetäisyyden rajaksi tulee 400 – 600 km ja 40 Gb/s tiedonsiirtonopeudella etäisyys on 16 kertaa pienempi. (Kartalopoulos 2002, 410.)

Polarisaatiodispersio muodostuu ongelmaksi vasta pitkän matkan järjestelmissä. Sen vähentäminen on kuitenkin monimutkaista ja kallista. Polarisaatiodispersiota ei tapahdu niin paljoa, jos käytetään täysin pyöreäytimiä valokuituja koko linkin matkalla. (Kartalopoulos 2002, 410 – 411.) Järjestelmän suunnitteluvaiheessa onkin siis erittäin tärkeää valita sellaiset valokuidut, joita käytettäessä polarisaatiodispersiota syntyy mahdollisimman vähän.

5.4 DWDM-tekniikan ongelmia

DWDM-tekniikka ei ole vielä täysin valmis teknologia mikä tarkoittaa sitä, että vielä on olemassa ongelmia, jotka täytyy ratkaista. Näihin ongelmiin kuuluu yhteensopivuus, optisen suorituskyvyn tarkkailu ja tietoverkon riittävyyden tulevaisuudessa varmistaminen. (Kartalopoulos 2002, 417.)

5.4.1 Yhteensopivuus

Yhteensopivuuden varmistaminen tulee hyvin vaikeaksi, kun eri DWDM-laitteiden valmistajat suunnittelevat järjestelmiä perustavanlaatuisilla eroilla. Pelkästään se, että järjestelmät ovat ITU-T -suositusten mukaisia, ei takaa järjestelmien yhteensopivuutta. Esimerkiksi jos yksi maa päättää ottaa käyttöön L-alueen aallonpituudet, ja toinen maa käyttää C-alueen aallonpituuksia niin nämä järjestelmät eivät pysty kommunikoimaan keskenään. (Kartalopoulos 2002, 418.) IEEE Optical

Domain Service Interconnect (ODSI) -standardissa käsitellään tähän aiheeseen liittyviä ongelmia.

5.4.2 Optisen suorituskvyn tarkkailu

Suorituskvyn tarkkailua käytetään solmukohdissa kanavakohtaisesti. (Kartalopoulos 2002, 418.) Mitattavat arvot ovat aallonpituus, teho ja optisen signaalin suhde kohinaan. Käyttäjä pystyy itse määrittämään raja-arvot edellä mainituille parametreille, joilla aiheutuu hälytys. (Cisco ONS 15216 Optical Performance Monitor (OPM).)

5.4.3 Tulevaisuutta varten valmistelu

Jokaisella tietoverkko-operaattorilla on huolenaiheena, kuinka pystytään varmistamaan, että järjestelmä pystyy kasvamaan ja täyttämään aina vain suurenevat tiedonsiirtovaatimukset. Nykyiset järjestelmät suunnitellaan modulaarisiksi rauta- ja ohjelmistotasolla. Rautatason modulaarisuus tuo joustavuutta korvata tai päivittää järjestelmän komponentteja. Ohjelmistotason modulaarisuus puolestaan tuo mahdollisuuden päivittää järjestelmässä käytettäviä ohjelmistoja.

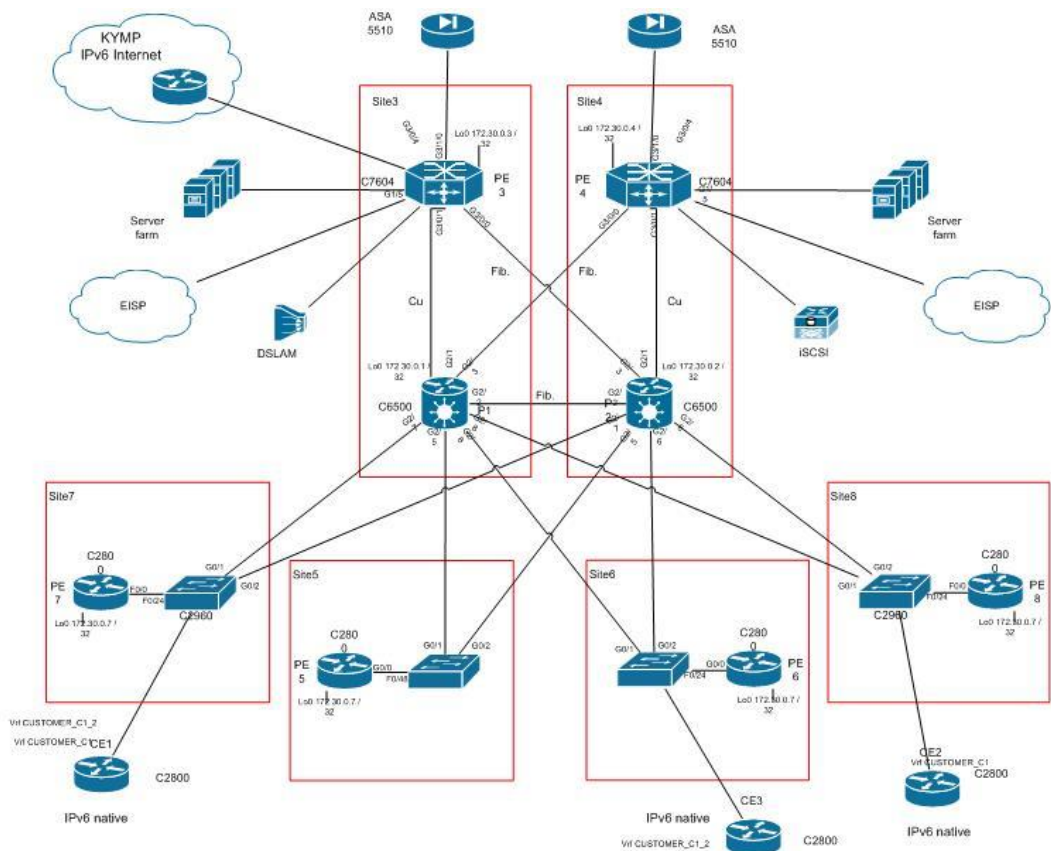
6 SIMUNET-VERKKO JA TEHTÄVÄN MÄÄRITTELY

6.1 SimuNet

SimuNet-lab on EAKR-hanke, joka on syntynyt yhteistyössä Kymenlaakson ammattikorkeakoulun ja kaakonkulman verkko-operaattoreiden kanssa. SimuNet sijaitsee Kymenlaakson ammattikorkeakoulun ICTLAB-opetusympäristössä. SimuNet on testaus-, tutkimus- ja tuotekehityslaboratorio, joka on todellisen verkko-operaattorin tuotantoverkon kaltainen testiympäristö. SimuNetin avulla pystytään mallintamaan samankaltaisia tilanteita kuin verkko-operaattoreilla on uusien ratkaisujen toteuttamisessa. (Kettunen 2009.) SimuNet soveltuu hyvin opinnäytetyön kaltaisten migraatiotilanteiden tutkimiseen. SimuNet on tärkeässä osassa tätä opinnäytetyötä, sillä laitteiden asennus suoritettiin siellä.

6.2 Tehtävän määrittäminen

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on saada alla olevassa kuvassa näkyvät SimuNetin P1-, P2-, PE3- ja PE4-laitteiden väliset runkoyhteydet siirrettyä kuljetettavaksi CWDM-tekniikalla. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuvassa 20 merkittyihin Site3- ja Site4-alueisiin. Käytettävät CWDM-laitteet ovat Allied Telesisin valmistamia AT-WD1008-laitteita. Tarkoituksena on kytkeä nämä CWDM-laitteet yhteen siten, että ne muodostavat renkaan. Toteutuksen pitää sietää minkä tahansa yhden laitteen tai linkin vikaantuminen ilman, että yhteydet katkeavat.



Kuva 20. Kuvattuna SimuNetin fyysinen kytkentä (Kettunen 2009)

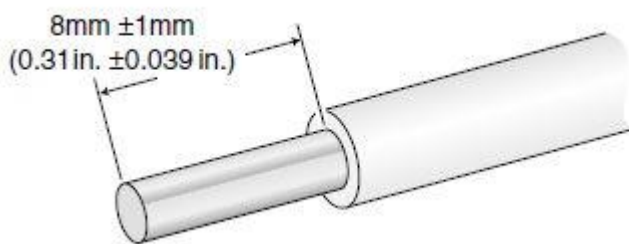
Annettu tehtävä haluttiin toteuttaa kuten todellisen verkko-operaattorin tuotannossa olevan verkon migraatio toteutettaisiin. Sen tähden ennen käytännön toimiin ryhtymistä laadittiin huoltokatkosuunnitelma. Vasta tämän jälkeen migraatio toteutettiin tehdyn suunnitelma mukaan.

7 HUOLTOKATKOSUUNNITELMA: SIMUNETIN RUNKOYHTEYKSIEN SIIRTO CWDM-TEKNIikkaan

Tämän opinnäytetyön osana on huoltokatkosuunnitelma CWDM-migraatiosta SimuNetiin. Huoltokatkosuunnitelman tarkoituksena on ohjata laitteiden asennusta ja konfigurointia. Huoltokatkosuunnitelman avulla pystytään suunnittelemaan etukäteen toimenpiteet, jotka tullaan suorittamaan sekä vikatilanteen sattuessa pystytään toimimaan nopeasti tilanteen korjaamiseksi. Näin pystytään minimoimaan laitteiden alhaallaoloaika.

1. AT-WD1008-laitteiden asennus laitekaappeihin

HUOM! Kuori virtakaapeleita korkeintaan 8 ± 1 mm. Virtakaapeleista ei saa jäädä näkyviin erillisiä kuparisäikeitä.



Kuva 21. Kuva osoittaa kuinka paljon virtakaapelia kuuluu kuoria (AT-WD1008 Installation Guide)

Toimenpiteet: Asenna kaksi kappaletta AT-WD1008-laitteita Site 3 -laitekaappiin. Asenna kaksi kappaletta AT-WD1008-laitteita Site 4 -laitekaappiin. Asenna yksi laite uuteen laitekaappiin. Laitteissa on redundantit virtalähteet, jotka käyttävät 36-60 V tasavirtaa. Varmista, että laitteet ovat pois päältä ja sitten kytke virtakaapelit molempiin virtalähteisiin.

AT-WD1008-laitteiden tehotiedot:

Input voltage:

AC 100-240VAC, 3.2A maximum

DC 36-60VDC, 7.9A maximum

AC input frequency 47-63Hz

Power consumption 75W maximum

Heat dissipation 256BTU/hour maximum

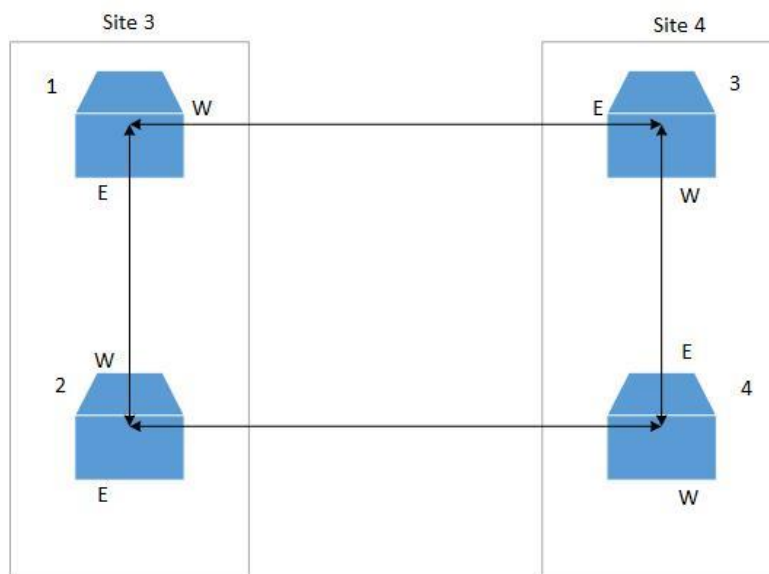
2. Valokuitujen valmistelu

Toimenpiteet: Valmistele yksimuotovalokuidut CWDM-laitteiden multipleksaavien east- ja west-porttien välille. East- ja west-porteissa käytetään 10/125-mikronin yksimuotokuituja SC-liittimillä. Valmistele valokuidut P1-, P2-, PE3-, ja PE4-laitteiden ja CWDM-laitteiden välille. CWDM-laitteissa käytettävissä GBIC-moduuleissa käytetään myös SC-liittimiä.

3. CWDM-laitteiden välisen runkoverkon muodostus

HUOM! AT-WD1008-laitteessa on tehokkaat ja näkymättömät laserit, jotka voivat aiheuttaa silmävaurioita. East- ja west-porteissa on turvamekanismi, joka sammuttaa laserit, jos valokuitu irtoaa portista, mutta GBIC-moduulipaikoissa ei ole tätä toimintoa.

Toimenpiteet: Kytke yksimuotovalokuidut CWDM-laitteiden multipleksaaviin portteihin alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 22. East- ja west-porttien kytkennät. 1, 2, 3 ja 4 kuvaavat CWDM-laitteiden nimiä.

4. Tarkista P1-, P2-, PE3-, ja PE4-laitteiden toiminta

Toimenpiteet: Tarkista P1- ja P2-laitteiden G2/1- ja G2/2-porttien konfiguraatiot ja että ne toimivat oikein. Tarkista tämän jälkeen PE3- ja PE4-laitteiden G3/0/0- ja G3/0/1-porttien konfiguraatiot ja että ne toimivat oikein. Käytä komentoja *show interface Gx/x/x*, *show ip ospf neighbor* ja *show ip route*.

Tee varmuuskopiot kaikkien yllämainittujen porttien konfiguraatioista. Käytä komentoa *show running-config Gx/x/x*.

5. Siirrä runkoverkon linkit yksi kerrallaan CWDM-laitteisiin

PE3:n ja P2:n välinen kuitulinkki: kytke PE3-laitteen G3/0/0-portista valokuitu 1. CWDM-laitteen kanavaan 1. Seuraavaksi kytke 3. CWDM-laitteen 5. kanavasta valokuitu P2-laitteen G2/3-porttiin. Tarkista kyseisten porttien tilanne komennolla *show interface Gx/x/x* ja että laitteiden naapuruussuhteet ovat kunnossa käyttämällä komentoa *show ip ospf neighbor*. Varmista komennolla *show ip route*, että aliverkko 192.168.23.0/24 löytyy laitteiden reititystaulusta. Vertaa tilannetta kohdan 4. tilanteeseen. Jos kaikki toimii oikein, siirry seuraavaan kohtaan.

PE4:n ja P1:n välinen kuitulinkki: kytke PE4-laitteen G3/0/0-portista valokuitu 4. CWDM-laitteen kanavaan 1. Seuraavaksi kytke 2. CWDM-laitteen 5. kanavasta valokuitu P1-laitteen G2/3-porttiin. Tarkista kyseisten porttien tilanne komennolla *show interface Gx/x/x* ja että laitteiden naapuruussuhteet ovat kunnossa käyttämällä komentoa *show ip ospf neighbor*. Varmista komennolla *show ip route*, että aliverkko 192.168.14.0/24 löytyy laitteiden reititystaulusta. Vertaa tilannetta kohdan 4. tilanteeseen. Jos kaikki toimii oikein, siirry seuraavaan kohtaan.

P1:n ja P2:n välinen kuitulinkki: kytke P1-laitteen G2/2-portista valokuitu 2. CWDM-laitteen kanavaan 6. Sitten kytke 4. CWDM-laitteen kanavasta 2. valokuitu P2-laitteen G2/2-porttiin. Tarkista kyseisten porttien tilanne komennolla *show interface Gx/x/x* ja että laitteiden naapuruussuhteet ovat kunnossa käyttämällä komentoa *show ip ospf*

neighbor. Varmista komennolla *show ip route*, että aliverkko 192.168.12.0/24 löytyy laitteiden reititystaulusta. Vertaa tilannetta kohdan 4. tilanteeseen. Jos kaikki toimii oikein, siirry seuraavaan kohtaan.

6. Tarkista laitteiden toiminta

Toimenpiteet: Kun kaikki linkit on yksi kerrallaan onnistuneesti siirretty, tarkista vielä lopuksi, että kaikki laitteet ja linkit toimivat oikein. Käytä käskyjä *show interfaces description*, *show ip ospf neighbor* ja *show ip route*.

8 TYÖN TOTEUTUS JA TESTAUS

Työn tarkoituksena oli siirtää SimuNetin P1-, P2-, PE3- ja PE4-laitteiden väliset runkoyhteydet kuljetettavaksi CWDM-tekniikalla. Käytin kytkentöjen tekemisessä apuna kappaleessa 7 olevaa huoltokatkosuunnitelmaa.

Ensimmäiseksi kytkin neljä CWDM-laitetta rengastopologiaan, jonka jälkeen tarkistin PE3-, PE4-, P1- ja P2-laitteiden porttien toiminnan komennolla *show interface Gx/x/x* ja otin porttien konfiguraatioista varmuuskopiot käyttämällä komentoa *show running-config Gx/x/x*. Alla on PE3-laitteen G3/0/0-portin konfiguraatio.

```
interface GigabitEthernet3/0/0
description P2-PE3 fiber
dampening
mtu 1600
ip address 192.168.23.3 255.255.255.0
ip pim sparse-mode
ip igmp version 3
ip ospf cost 1
carrier-delay msec 0
negotiation auto
mpls ip
mpls traffic-eng tunnels
bfd interval 100 min_rx 100 multiplier 3
ip rsvp bandwidth 3900
```

Seuraavaksi tarkistin PE3-laitteen G3/0/0-portin ja P2-laitteen G2/3-portin tilat ennen kyseisen linkin siirtämistä CWDM-järjestelmään. Käytin komentoja *show interface Gx/x/x*, *show ip ospf neighbor* ja *show ip route*.

```
PE3#show ip ospf neighbor
```

| Neighbor ID | Pri | State | Dead Time | Address | Interface |
|-------------|-----|----------|-----------|--------------|----------------------|
| 172.30.0.1 | 1 | FULL/BDR | 00:00:35 | 192.168.13.1 | GigabitEthernet3/0/1 |
| 172.30.0.2 | 1 | FULL/BDR | 00:00:31 | 192.168.23.2 | GigabitEthernet3/0/0 |

Kuva 23. PE3-laitteen OSPF-naapuruussuhteet ovat kunnossa.

Tämän jälkeen suoritin PE3- ja P2-laitteiden välisen linkin siirron. Kun kyseisen linkin siirto oli tehty, tarkistin uudelleen PE3- ja P2-laitteiden toiminnan komennoilla *show interface Gx/x/x*, *show ip ospf neighbor* ja *show ip route*.

```
PE3#show int g3/0/0
GigabitEthernet3/0/0 is up, line protocol is up
  Hardware is GigEther SPA, address is 0024.144b.e880 (bia 0024.144b.e880)
  Description: P2-PE3 fiber
  Internet address is 192.168.23.3/24
  MTU 1600 bytes, BW 1000000 Kbit/sec, DLY 10 usec,
    reliability 255/255, txload 1/255, rxload 1/255
  Encapsulation ARPA, loopback not set
  Keepalive not supported
  Full Duplex, 1000Mbps, link type is auto, media type is unknown media type
  output flow-control is unsupported, input flow-control is unsupported
  Carrier delay is 0 msec
  ARP type: ARPA, ARP Timeout 04:00:00
  Last input 00:00:00, output 00:00:00, output hang never
  Last clearing of "show interface" counters never
  Input queue: 0/75/0/0 (size/max/drops/flushes); Total output drops: 0
  Queueing strategy: fifo
  Output queue: 0/40 (size/max)
  5 minute input rate 51000 bits/sec, 9 packets/sec
  5 minute output rate 86000 bits/sec, 8 packets/sec
    60475485 packets input, 35626252786 bytes, 0 no buffer
    Received 9 broadcasts (0 IP multicasts)
    0 runs, 0 giants, 0 throttles
    0 input errors, 0 CRC, 0 frame, 0 overrun, 0 ignored
    0 watchdog, 1523808 multicast, 0 pause input
    57528510 packets output, 21975405455 bytes, 0 underruns
    0 output errors, 0 collisions, 2 interface resets
    0 unknown protocol drops
    0 babbles, 0 late collision, 0 deferred
    0 lost carrier, 0 no carrier, 0 pause output
    0 output buffer failures, 0 output buffers swapped out
```

Kuva 24. PE3-laitteen G3/0/0-portti toimii ilman virheitä.

```
PE3#show ip ospf neighbor
```

| Neighbor ID | Pri | State | Dead Time | Address | Interface |
|-------------|-----|----------|-----------|--------------|----------------------|
| 172.30.0.1 | 1 | FULL/BDR | 00:00:37 | 192.168.13.1 | GigabitEthernet3/0/1 |
| 172.30.0.2 | 1 | FULL/BDR | 00:00:36 | 192.168.23.2 | GigabitEthernet3/0/0 |

Kuva 25. PE3-laitteen OSPF-naapuruussuhteet ovat samassa tilassa, kuin ennen linkin siirtämistä.

Tarkistin vielä lopuksi, että OSPF-naapurin loopback-osoite ja aliverkko 192.168.23.0/24 löytyy molempien laitteiden reititystauluista.

```

O    192.168.12.0/24
    [110/11] via 192.168.23.2, 00:03:43, GigabitEthernet3/0/0
192.168.13.0/24 is variably subnetted, 2 subnets, 2 masks
C    192.168.13.0/24 is directly connected, GigabitEthernet3/0/1
L    192.168.13.3/32 is directly connected, GigabitEthernet3/0/1
O    192.168.14.0/24
    [110/20] via 192.168.13.1, 00:37:13, GigabitEthernet3/0/1
O    192.168.15.0/24
    [110/20] via 192.168.13.1, 00:37:13, GigabitEthernet3/0/1
O    192.168.16.0/24
    [110/20] via 192.168.13.1, 00:37:13, GigabitEthernet3/0/1
O    192.168.17.0/24
    [110/20] via 192.168.13.1, 00:37:13, GigabitEthernet3/0/1
192.168.23.0/24 is variably subnetted, 2 subnets, 2 masks
C    192.168.23.0/24 is directly connected, GigabitEthernet3/0/0
L    192.168.23.3/32 is directly connected, GigabitEthernet3/0/0

```

Kuva 26. Osa PE3-laitteen reititystaulusta, josta löytyy aliverkko 192.168.23.0/24.

```

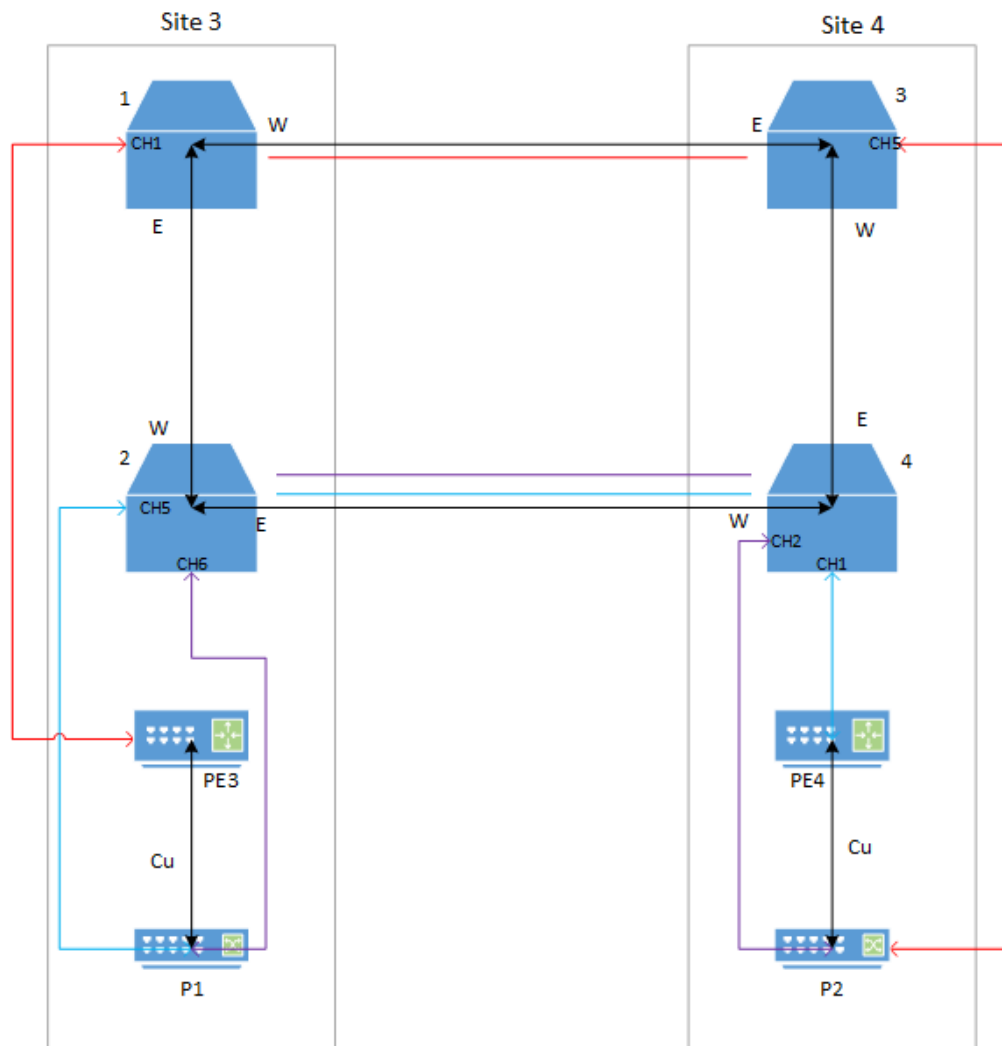
O    172.30.0.2/32
    [110/2] via 192.168.23.2, 00:03:43, GigabitEthernet3/0/0

```

Kuva 27. PE3-laitteen reititystaulussa on P2-laitteen loopback-osoite.

Suoritin PE4- ja P1-laitteiden ja P1- ja P2-laitteiden välisten linkkien siirron tehden samat toimenpiteet, kuin PE3- ja P2-laitteiden välisen linkin siirrossa. Kaikki linkit saatiin lopuksi onnistuneesti siirrettyä CWDM-järjestelmään.

Kuvasta 28 nähdään lopullinen kytkentä, ja mitä reittiä pitkin mikäkin linkki kuljetetaan. Kuvasta näkyy myös mihin CWDM-laitteen kanavaan kyseinen linkki kytketään.



Kuva 28. Eri väreit kuvastavat reittiä mitä pitkin runkolinkki kuljetetaan. Punainen väri edustaa PE3-P2-, sininen PE4-P1- ja violetti P1-P2-linkkiä. PE3-P1- ja PE4-P2-laitteiden väliset linkit ovat suoraan kytkettyjä kuparilinkkejä.

9 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä CWDM-tekniikan migraatio SimuNetiin. Työn lopputuloksena tavoite saavutettiin ja runkoverkon linkit saatiin onnistuneesti siirrettyä CWDM-tekniikkaan. Koska linkkien migraatio suoritettiin yksi linkki kerrallaan, verkon saatavuus ei missään vaiheessa migraatiota estynyt verkon redundanttisuuden ansiosta.

Vaikka työn käytännön toteutus oli kokonaisuudessaan suhteellisen yksinkertainen, asettivat SimuNetin tosielämän tilanteita vastaavat olosuhteet työlle suuria haasteita. Kun tuotannossa olevaan tietoverkkoon tehdään muutoksia, tulee eteen useita tekijöitä, jotka täytyy ottaa huomioon. Koska saatavuus ei saa estyä missään vaiheessa, on erittäin tärkeää, että tehdään huolellinen ja kattava huoltokatkosuunnitelma. Tällä tavoin voidaan varmistaa, että toimenpiteet sujuvat suunnitellusti.

Alunperin tämä opinnäytetyö oli tarkoitus toteuttaa käyttäen viittä CWDM-laitetta, joka ei täysin onnistunut. Työ toteutettiin käyttäen neljää laitetta yhden laitteen käyttöönotto-ongelmien takia. CWDM-laitteissa on AT-WDM02 hallintamoduuli, johon voidaan ottaa yhteys RJ45- ja RS232-porttien kautta. Neljään CWDM-laitteeseen oli valmiiksi asetettu hallinta IP-osoite, jolloin niihin saatiin helposti Telnet-yhteys muodostettua. Yhdessä laitteessa hallinta IP-osoitetta ei kuitenkaan oltu ennalta määriteltä, jolloin siihen täytyi yrittää muodostaa yhteys hallintamoduulissa olevan RS232-portin kautta. Valmistajan omaa kaapelia ei kuitenkaan löytynyt, eikä itse tekemilläni kaapeleilla saatu täysin toimivaa yhteyttä muodostettua. Tämän takia työ jouduttiin lopulta toteuttamaan käyttäen vain neljää CWDM-laitetta.

Tämä vaikeutti työn käytännön osuutta huomattavasti. Yritin tehdä tarvittavan kaapelin itse, mutta täysin toimivaa yhteyttä ei silti saatu aikaan.

Kytkin sarjakaapelin lähetys- ja vastaanotto-signaalit ristiin ja maasignaalin suoraan, jolloin yhteys saatiin muodostettua. Yhteys ei kuitenkaan toiminut täydellisesti: laite ei rekisteröinyt kaikkia syötettyjä painalluksia, jolloin sitä ei pystynyt konfiguroimaan. Tein myös kaapelin, jossa oli käytössä kaikki RS232-signaalit, mutta sillä yhteys ei toiminut ollenkaan. Kokeilin useita erilaisia terminaaliemulaattori-ohjelmia, mm. Putty, Tera Term Pro sekä Hyper Terminal, mutta yhteys ei toiminut millään näistä täydellisesti. Käytin terminaaliemulaattoreissa AT-S47-manuaalin mukaisia asetuksia.

Työn jatkokehitysmahdollisuutena olisi kahdentaa P1- ja P2-laitteiden välinen linkki siten, että uusi linkki kuljetettaisiin CWDM 1- ja CWDM 3 -laitteiden kautta nykyisen CWDM 2- ja CWDM 4 -laitteiden kautta kulkevan linkin lisäksi. Linkit yhdistettäisiin tällöin yhdeksi loogiseksi linkiksi käyttäen Gigabit EtherChannel –tekniikkaa. Lisäksi jatkomahdollisuuksia työlle olisi yrittää saada tästä työstä pois jäänyt CWDM-laite

käyttöön ja tutkia CWDM-laitteiden multipleksaavien porttien tehonsyöttöä, sillä suorittamani tehonmittaukset antoivat hyvin erikoisia tuloksia. Laitteiden valmistajan mukaan tehon pitäisi olla -2 – -25,5 dBm. Saamani mittaustulokset ovat paljon pienemmät, noin -40 dBm 1310 nm:n aallonpituusalueella ja jäävät näin ollen määritellyn alueen ulkopuolelle. Koska linkit kuitenkin toimivat, on mahdollista, että mittauslaitte on rikki tai sen kalibrointi on pielessä. Koska mittaustulokset olivat näin epäluotettavia, jouduin jättämään työstä linkkibudjettien laskennat pois.

LÄHTEET

Agrawal, P. 2010. Fiber-Optic Communication Systems. Saatavissa:

<http://site.ebrary.com/xhalax-ng.kyamk.fi:2048/lib/kyam/docDetail.action?docID=10441490&p00>

Allied Telesyn, 2003. AT-S47 User's Guide. Saatavissa:

http://www.alliedtelesyn.com/media/datasheets/guides/s47_ug_a_v10.pdf

Cisco 40GBASE QSFP+ Modules, 2012. Saatavissa:

http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/modules/ps5455/data_sheet_c78-660083.pdf

Cisco ONS 15216, 2001. Optical Performance Monitor (OPM). Saatavissa:

http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/olpl/metro/15200/prodlit/1550_pp.pdf

Helkama Bica Oy, 2001. Valokaapelit tele- ja tietoverkoissa. Saatavissa:

<http://helkamabica.fi/pdf/FlashCord-fi.pdf>

ITU-T G.694.1, 2012. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid

Saatavissa: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items

ITU-T G.694.2, 2003. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid

Saatavissa: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.2-200312-I!!PDF-E&type=items

ITU-T G.695, 2010. Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing

applications: Saatavissa: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.695-201010-I!!PDF-E&type=items

ITU-T G.973.1, 2009. Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fibre submarine cable systems. Saatavissa:

http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.973.1-200911-I!!PDF-E&type=items

ITU-T G.698.1, 2009. Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces. Saatavissa: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.698.1-200911-I!!PDF-E&type=items

Kartalopoulos, S. 2002. DWDM: Networks, Devices, and Technology

Kettunen, M. 2009. Tietoverkkotekniikan uudet haasteet SimuNet-hankkeen lähtökohtana. Saatavissa:

<http://papaya.ictlab.kyamk.fi/~amake/SimuNet/SimuNet%20artikkeliv6a.pdf>

Lam, F. 2007. Passive Optical Networks : Principles and Practice Saatavissa:

<http://site.ebrary.com.xhalax-ng.kyamk.fi:2048/lib/kyam/docDetail.action?docID=10201889&p00=cwdm>

Sivalingam, K. & Subramaniam, S. 2000. Optical WDM Networks: Principles and Practice Saatavissa: [http://site.ebrary.com.xhalax-](http://site.ebrary.com.xhalax-ng.kyamk.fi:2048/lib/kyam/docDetail.action?docID=10051655&p00=wdm)

[ng.kyamk.fi:2048/lib/kyam/docDetail.action?docID=10051655&p00=wdm](http://site.ebrary.com.xhalax-ng.kyamk.fi:2048/lib/kyam/docDetail.action?docID=10051655&p00=wdm)

Thiele & Nebeling 2007. Coarse Wavelength Division Multiplexing

Viestintävirasto, 2006. Optiset liityntäverkot v2. Saatavissa:

<http://www.ficora.fi/attachments/suomiry/5f1Eutml7/TRaportti012006v2.pdf>